

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ARTHUR HUMBERTO ROCHA FERREIRA

INTEGRAÇÃO RIO – RESERVATÓRIO: ESTRATÉGIA PARA  
ENQUADRAMENTO DINÂMICO UTILIZANDO O MODELO HEC-RAS

CURITIBA

2021

ARTHUR HUMBERTO ROCHA FERREIRA

INTEGRAÇÃO RIO – RESERVATÓRIO: ESTRATÉGIA PARA  
ENQUADRAMENTO DINÂMICO UTILIZANDO O MODELO HEC-RAS

Documento de defesa apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Cristovão V. S. Fernandes, Ph. D.

Co-orientadora: Danieli M. Ferreira, Ph. D.

CURITIBA

2021



Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F383i     Ferreira, Arthur Humberto Rocha  
Integração rio - reservatório [recurso eletrônico] : estratégia para enquadramento dinâmico  
utilizando o modelo HEC-RAS/ Arthur Humberto Rocha Ferreira. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Recursos Hídricos e Ambiental, 2021.

Orientador: Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes.  
Coorientadora: Danieli M. Ferreira.

1. Desenvolvimento de recursos hídricos. 2. Água - Qualidade. 3. Controle de qualidade da água.  
4. Reservatórios. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fernandes, Cristovão Vicente  
Scapulatempo. III. Ferreira, Danieli M. IV. Título.

CDD: 363.61

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ARTHUR HUMBERTO ROCHA FERREIRA** intitulada: **Integração rio-reservatório: Estratégia para enquadramento dinâmico utilizando o modelo HEC-RAS**, sob orientação do Prof. Dr. CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua REPROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Março de 2021.

Assinatura Eletrônica

31/03/2021 17:36:20.0

CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

31/03/2021 15:55:56.0

ADILSON PINHEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU)

Assinatura Eletrônica

29/03/2021 13:41:49.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

29/03/2021 17:19:04.0

GABRIEL HENRIQUE DE ALMEIDA PEREIRA

Avaliador Externo (null)

Assinatura Eletrônica

08/04/2021 10:07:19.0

DIANA LEITE CAVALCANTI

Avaliador Externo (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS)

## **AGRADECIMENTOS**

O estudo apresentado está inserido no projeto de auxílio ao Enquadramentos dos Rios Paranapanema e Itararé, estabelecido em parceria entre a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR). O autor agradece a ANA pelo suporte e a todos os pesquisadores e colaboradores envolvidos no estudo, assim como a CAPES, CNPq, Universidade Federal do Paraná e PPGERHA.

Agradeço também aos meus orientadores, Cristovão V. S. Fernandes e Danieli M. Ferreira por todo o apoio ao longo desses dois anos, assim como aos meus amigos e minha família.



## RESUMO

A gestão de recursos hídricos no Brasil conta com alguns instrumentos, como o Enquadramento, que estabelece metas de qualidade da água em corpos hídricos baseando-se em concentrações limite para uma série de parâmetros, atuando como base para definição de metas futuras. Essas metas visam relacionar os usos preponderantes do solo na bacia e processos de urbanização com os requisitos de qualidade da água, que devem ser garantidos para os usos atuais e futuros mais exigentes. O processo para definição dessas metas é tradicionalmente baseado em vazões de referência e simulações em regime permanente, abordagem que não considera variações temporais. O objetivo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água para os rios da união da Bacia do Paranapanema, e o impacto da variação temporal como ferramenta adicional de apoio a gestão de recursos hídricos. A região é caracterizada pelos reservatórios em cascata, simulados de forma integrada com o rio usando HEC-RAS, e aplicando cenários futuros de mudanças no uso de solo e urbanização que representam o aumento no lançamento de poluentes que atingem o rio. Adicionalmente, analisa-se o comportamento da região de transição rio-reservatório e efeitos do represamento em cascata. Os resultados indicaram a capacidade do método em estimar a frequência de conformidade com os limites de classe para os cenários, confirmando a aplicabilidade da metodologia e HEC-RAS em aplicações de gestão de recursos hídricos nessa escala.

Palavras-chave: Gestão de Recursos hídricos, Modelagem de Qualidade da Água, Modelagem em Regime não-permanente, HEC-RAS, Reservatórios em Cascata.

## ABSTRACT

Part of the management of water resources in Brazil is controlled by the Enquadramento, a tool that defines classes for rivers, based on limit concentrations of water quality parameters, acting as a basis for defining future goals for the river and its basin. These goals can relate land use in the basin and urbanization processes to water quality, which must be guaranteed for the most demanding current and future uses. The process for setting these goals is traditionally based on reference flows and steady flow simulations, an approach that does not consider temporal variations. The objective of this work is to evaluate the applicability of hydrodynamic and water quality models for the main rivers in the Paranapanema Basin, and the impact of temporal variation as an additional management tool. The region is characterized by cascading reservoirs, fully simulated along with the river using HEC-RAS, and applying future scenarios of changes in land use and urbanization that represent an increase in the release of diffuse pollutants. In addition, the behavior of the transition region between river and reservoir, as well as the effects of the cascade reservoirs are analyzed. The results indicated the capacity of the method to estimate the frequency of compliance with the class limits for the scenarios, confirming the applicability of the methodology and HEC-RAS in water resource management applications of this scale.

Key-words: Water Resources Management, Water Quality Modeling, Unsteady Flow Modelling, HEC-RAS, Cascade Reservoirs.

## LISTA DE FIGURAS

1	Na esquerda: distribuição de fauna ao longo do rio, transição rio-reservatório e reservatório. Na direita: riqueza (ssp), número de peixes, Diversidade (Shannon - $H'$ ) e uniformidade. . . . .	32
2	Variáveis envolvidas na análise de sistemas rio - reservatório. . . . .	34
3	Comparação de simulações de qualidade da água baseadas em regime permanente e não permanente. . . . .	37
4	Localização da Bacia do Paranapanema, rios Paranapanema e Itararé, três reservatórios de grande porte e UGHs. . . . .	45
5	Mapa das estações com vazões diárias observadas para o ano de 2012 e base para as condições de contorno. Os números correspondem aos códigos de estação: 1 – 64005000; 2 – 64080000; 3 = 64215080; 4 = 64220050; 5 = 64270080; 6 = 64278080; 7 = 64332080; 8 = 64345075; 9 = 64345080; 10 = 64516080; 11 = 64535080; 12 = 64571100; 13 = 64231000; 14 = 64247000. . . . .	49
6	Em verde, esquema das seções transversais, na linha azul o eixo dos rio e na escala de azul, as elevações do terreno. A esquerda, mapa com a largura e posição das 77 seções transversais originais, e a direita o mapa com as seções transversais interpoladas linearmente a cada 250 metros. . . . .	50
7	Esquema das células computacionais do modelo hidrodinâmico, com nomenclatura usada para cálculo do tempo a percorrer até a barragem. . . .	51
8	Condições de contorno a montante para cada um dos rios. . . . .	52
9	Hidrogramas das estações usadas como condições de contorno das barragens (vazões defluentes). . . . .	54
10	Fenômenos representados na equação ADR. FONTE: O autor. . . . .	55
11	Relações entre taxas de conversão no HEC-RAS. . . . .	57
12	Mapa das estações estrela de qualidade da água, onde os números correspondem aos código HIDROWEB e CETESB: 1 = 64081000 / PARP 02100; 2 = 64214000 / JURU 02500; 3 = 64219000; 4 = 64278080; 5 = 64326000 / PARP02500; 6 = 64516900 / PARP 02750; 7 = 64571100 / PARP02900; 8 = 64245200 / ITAR 02500. A = 64081000 e B = 64231000. . . . .	62



13	Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64080000. . . . .	66
14	Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64080000. . . . .	66
15	Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64220050. . . . .	67
16	Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64220050. . . . .	67
17	Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64247000. . . . .	68
18	Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64247000. . . . .	68
19	Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64278080. . . . .	69
20	Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64278080. . . . .	69
21	Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64332080. . . . .	70
22	Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64332080. . . . .	70
23	Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64345075. . . . .	71
24	Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64345075. . . . .	71
25	Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64345080. . . . .	72
26	Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64345080 . . . . .	72
27	Perfil de velocidades para o Rio Paranapanema gerado nas simulações para o dia 09/06/2012 00:00 e mediana das séries de velocidades observadas observados, para os pontos com dados disponíveis. . . . .	74
28	Perfil da superfície da água para o Rio Paranapanema gerado nas simulações.	75

29	Perfil de profundidades gerado pela simulação para o dia 09/06/2012 00:00, comparada a mediana das séries de nível observados observados, para os pontos com dados disponíveis. . . . .	76
30	Perfil de velocidades para o Rio Itararé gerado nas simulações para o dia 09/06/2012 00:00 e mediana das séries de velocidades observadas observados, para os pontos com dados disponíveis. Os dois pontos próximos representam estações próximas. . . . .	77
31	Perfil da superfície de escoamento para o Rio Itararé gerado nas simulações.	77
32	Definição dos elementos de um boxplot. . . . .	79
33	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	80
34	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	81
35	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 61219000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	81
36	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	82
37	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64278080 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	82
38	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	83
39	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	83

40	Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	84
41	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	85
42	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	86
43	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 61219000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	86
44	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	87
45	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64278080 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	87
46	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	88
47	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	88
48	Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	89
49	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	90



50	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	90
51	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 61219000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	91
52	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	91
53	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64278080 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	92
54	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	92
55	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	93
56	Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	93
57	Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	94
58	Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	95
59	Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	95

60	Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	96
61	Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	96
62	Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe. . . . .	97
63	Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim. . . . .	99
64	Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim. . . . .	100
65	Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim. . . . .	101
66	Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim. . . . .	101
67	Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes. . . . .	102
68	Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes. . . . .	103
69	Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes. . . . .	103
70	Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes. . . . .	104
71	Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Capivara. . . . .	105
72	Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Capivara. . . . .	105
73	Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Capivara. . . . .	106

74	Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Paranapama - Reservatório de Capivara. . . . .	107
75	Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes. . . . .	108
76	Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes. . . . .	108
77	Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes. . . . .	109
78	Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes. . . . .	110
79	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000. . . . .	112
80	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000. . . . .	112
81	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000. . . . .	113
82	Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000. . . . .	113
83	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000. . . . .	114
84	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000. . . . .	115
85	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000. . . . .	115
86	Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000. . . . .	116
87	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64219000. . . . .	116
88	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64219000. . . . .	117
89	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64219000. . . . .	117



90	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200. . . . .	118
91	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200. . . . .	119
92	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200. . . . .	119
93	Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200. . . . .	120
94	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64278080. . . . .	120
95	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64278080. . . . .	121
96	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64278080. . . . .	121
97	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000. . . . .	122
98	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000. . . . .	123
99	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000. . . . .	123
100	Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000. . . . .	124
101	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900. . . . .	125
102	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900. . . . .	125
103	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900. . . . .	126
104	Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900. . . . .	126
105	Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100. . . . .	127

106	Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100. . . . .	127
107	Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100. . . . .	128
108	Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100. . . . .	128
C.1	Vazões em um elemento infinitesimal . . . . .	155
D.2	Vista das elevações da bacia (MDE) e rios Paranapanema e Itararé, gerados a partir das seções transversais disponíveis no HIDROWEB. . . . .	166
D.3	Resultado da simulação usando o MDE e seções transversais disponíveis no HIDROWEB para geração da geometria, sobreposto ao MDE do terreno. Em azul, as área alagadas e na escala de cinza as elevações do terreno. . .	167
D.4	Mapa das estações com vazões diárias observadas para o ano de 2012 e base para as condições de contorno. Os números correspondem aos códigos de estação: 1 – 64005000; 2 – 64080000; 3 = 64215080; 4 = 64220050; 5 = 64270080; 6 = 64278080; 7 = 64332080; 8 = 64345075; 9 = 64345080; 10 = 64516080; 11 = 64535080; 12 = 64571100; 13 = 64231000; 14 = 64247000.	169
D.5	Hidrogramas simulados e observado - Estação 64220050. . . . .	169
D.6	Comparação do perfil de velocidades entre as simulações para fases A, B e C para o dia 09/06/2012 00:00. . . . .	171
D.7	Comparação do perfil de profundidades entre as simulações para fases A, B e C para o dia 09/06/2012 00:00 e dados observados. . . . .	172

## LISTA DE TABELAS

1	Resumo da tabela de revisão com os principais artigos no tema integração rio-reservatório. . . . .	40
2	Concentrações dos aportes laterais por trecho para o Rio Paranapanema, de acordo com a Figura 5, onde C = Concentração e EXT = Exutória. FONTE: O autor. . . . .	63
3	Concentrações dos aportes laterais por trecho para o Rio Itararé, de acordo com a Figura 5, onde C = Concentração. FONTE: O autor. . . . .	63
4	Coeficientes de cenarização para aumento do aporte de cargas nos cenários futuros. FONTE: Fernandes et al. (2020b). . . . .	64
5	Concentrações limite para as classes definidas resolução Conama nº 357/2005. . . . .	80
6	Disponibilidade de dados para as estações no Rio Paranapanema. FONTE: o autor . . . . .	152
7	Disponibilidade de dados para as estações no Rio Itararé. FONTE: o autor . . . . .	154
8	Descrição das simulações hidrodinâmicas preliminares. . . . .	168

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ADR	Advecção - Dispersão - Reação;
ANA	Agência Nacional de Águas;
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo;
COD	Carbono orgânico dissolvido;
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente;
DAEE	Departamento de Água e Energia Elétrica;
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio;
DEM	Modelo Digital de Elevação;
DQO	Demanda química de oxigênio;
EBS	<i>Energy Based Method</i> ;
EWS	<i>Equality of Water Surface</i> ;
GIS	<i>Geographic information system</i> ;
IAT	Instituto Água e Terra;
IQA	Índice de qualidade das águas;
MDE	Modelo Digital de Elevação;
MGB	Modelo de Grandes Bacias;
NH <sub>4</sub>	Nitrogênio Amoniacal;
NO <sub>2</sub>	Nitrito;
NO <sub>3</sub>	Nitrato;
NS	Nash-Sutcliffe;
NT	Nitrogênio Total;
OD	Oxigênio Dissolvido;
OrgN	Nitrogênio Orgânico Dissolvido;
OrgP	Fósforo dissolvido orgânico;
pH	Potencial hidrogeniônico;
PIB	Produto interno bruto
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos;
PO <sub>3</sub>	Ortofosfato dissolvido inorgânico;
PT	Fósforo Total;
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional;
shp	<i>shapefile</i> ;

AC	Superfície de Controle;
SIG	Sistema de Informações Georreferenciadas;
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos;
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission;</i>
ST	Seção Transversal;
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool;</i>
USACE	<i>United States Army Corp of Engineers;</i>
VC	Volume de Controle.

## LISTA DE SÍMBOLOS

Onde:

A	Área da seção transversal - $[m^2]$ ;
d	Profundidade média do canal - $[m]$ ;
$F_1$	Fração de absorção pelas Algas - $[-]$ ;
$F_a$	Força Gerada pelo Atrito - $[kg\ m\ s^{-2}]$ ;
$F_g$	Força Gerada pela Gravidade - $[kg\ m\ s^{-2}]$ ;
$F_p$	Força Gerada por Pressão - $[kg\ m\ s^{-2}]$ ;
$F_{pm}$	Força de Pressão a Montante - $[kg\ m\ s^{-2}]$ ;
$F_{pj}$	Força de Pressão a Jusante - $[kg\ m\ s^{-2}]$ ;
$F_x$	Força na Direção X - $[kg\ m\ s^{-2}]$ ;
g	Aceleração da gravidade - $[m/s^2]$ ;
GL	Limitante de crescimento das algas - $[-]$ ;
$K_1$	Taxa de desoxigenação - $[d^{-1}]$ ;
$K_3$	Taxa de perda de DBO por sedimentação - $[d_1]$ ;
KNR	Coefficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem - $[mgO^{-1}L]$ ;
n	Coefficiente de rugosidade de Manning - $[m^{-1/3}\ s]$ ;
N	Nível - $[m]$ ;
OrgN	Taxa de conversão do nitrogênio orgânico - $[kg / s]$ ;
q	Contribuição lateral por unidade de distância - $[m^3/s.m]$ ;
Q	Vazão - $[m^3/s]$ ;
$Q_{7,10}$	Vazão mínima de 7 dias de duração e tempo de recorrência de 10 anos - $[m^3/s]$ ;
$Q_{95}$	Vazão com tempo de permanência de 95% - $[m^3/s]$ ;
R	Raio Hidráulico - $[m]$ ;
S	Fontes e sumidouros - $[kg/s]$ ;
$S_f$	Inclinação da linha de energia - $[-]$ ;
t	Tempo - $[s]$ ;
TR	Tempo de Residência - $[dias]$ ;
U	Velocidade - $[m/s]$ ;
V	Volume da célula computacional - $[m^3]$ ;
x	Eixo x - $[-]$ ;
z	Elevação - $[m]$ ;

$z_0$	Elevação do fundo do canal - [m];
$\alpha_1$	Fração da biomassa de algas que é nitrogênio - [mg N mg A];
$\alpha_2$	Fração da biomassa de algas que é fósforo - [mgP / mgA];
$\alpha_4$	Consumo de O <sub>2</sub> por unidade de alga - [mgO mgA <sup>-1</sup> ];
$\alpha_6$	Consumo de O <sub>2</sub> por unidade de NO <sub>2</sub> oxidada - [mgO mgN <sup>-1</sup> ];
$\beta_1$	Conversão de amônia para nitrito - [d <sup>-1</sup> ];
$\beta_1$	Oxidação de amônia para nitrito - [d <sup>-1</sup> ];
$\beta_2$	Oxidação de nitrito para nitrato - [d <sup>-1</sup> ];
$\beta_3$	Conversão de OrgN para amônia - [d <sup>-1</sup> ];
$\beta_1$	Taxa de oxidação da amônia - [d <sup>-1</sup> ];
$\beta_2$	Taxa de oxidação do nitrito - [d <sup>-1</sup> ];
$\Delta F_p$	Variação nas Forças de Pressão - [kg m s <sup>-2</sup> ];
$\Delta x$	Intervalo no Eixo X [-];
$\Gamma$	Coeficiente de dispersão - [m <sup>2</sup> /s];
$\mu$	Taxa de crescimento local de algas - [d <sup>-1</sup> ];
$\phi$	Concentração - [kg/m <sup>3</sup> ];
$\rho$	Taxa de respiração das algas - [d <sup>-1</sup> ];
$\sigma_2$	Fonte bentônica de ortofosfato - [mgP m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ];
$\sigma_3$	Fonte bentônica de amônia - [mgNm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ]
$\sigma_4$	Sedimentação de OrgN - [-];
$AL$	Concentração de algas - [kg/m <sup>3</sup> ];
$D$	Distância entre os pontos - [ m ];
$d$	Profundidade média do canal - [m];
$IC$	Inclinação do fundo - [-];
$K_1$	Taxa de desoxigenação de DBO - [d <sup>-1</sup> ];
$K_2$	Taxa de reaeração diária - [d <sup>-1</sup> ];
$K_4$	Taxa de consumo de oxigênio pelo sedimento - [mg <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> ];
$L$	Comprimento do trecho - [ m ];
$O_{sat}$	Concentração de saturação do oxigênio dissolvido - [mgOLD <sup>-1</sup> ].

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>24</b>
1.1	Evidências de interesse . . . . .	27
1.2	Objetivo . . . . .	27
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	27
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	27
1.3	Abordagem Metodológica . . . . .	28
<b>2</b>	<b>Fundamentação Conceitual</b>	<b>30</b>
2.1	Integração Bacia, Rio e Reservatório . . . . .	30
2.1.1	Modelagem Integrada de Bacias Hidrográficas . . . . .	30
2.1.2	Integração Rio - Reservatório . . . . .	31
2.1.3	Reservatórios em cascata . . . . .	33
2.2	Gestão de Recursos Hídricos . . . . .	35
2.3	Escoamento em Rios . . . . .	37
2.4	Qualidade da Água . . . . .	38
2.5	HEC-RAS . . . . .	39
2.6	Síntese do Capítulo . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>43</b>
3.1	Caracterização dos Rios Paranapanema e Itararé . . . . .	44
3.2	Escoamento Não - Permanente em Canais Abertos . . . . .	46
3.3	Dados de Entrada . . . . .	48
3.3.1	Geometria . . . . .	49
3.3.2	Tempo a Percorrer até a Barragem . . . . .	50
3.3.3	Condições de Contorno . . . . .	51
3.4	Qualidade da Água em Rios . . . . .	54
3.4.1	Equação Advecção-Dispersão-Reação . . . . .	55
3.4.2	HEC-RAS . . . . .	56
3.4.2.1	Nitrogênio . . . . .	57



	Nitrogênio Orgânico Dissolvido - OrgN . . . . .	58
	Nitrogênio Amoniacal - $\text{NH}_4$ . . . . .	58
	Nitrito - $\text{NO}_2$ . . . . .	59
	Nitrato - $\text{NO}_3$ . . . . .	59
	Nitrogênio Total - NT . . . . .	59
3.4.2.2	Fósforo . . . . .	60
3.4.2.3	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) . . . . .	60
3.4.2.4	Oxigênio Dissolvido (OD) . . . . .	61
3.4.3	Dados de Entrada . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>65</b>
4.1	Modelo Hidrodinâmico . . . . .	65
4.1.1	Hidrogramas e Curvas de Permanência . . . . .	65
4.1.2	Perfis . . . . .	74
4.1.2.1	Paranapanema . . . . .	74
4.1.2.2	Perfis Itararé . . . . .	77
4.2	Qualidade da Água . . . . .	78
4.2.1	Estações Estrela - Curvas de Permanência e Boxplots . . . . .	79
4.2.1.1	Demanda Bioquímica de Oxigênio . . . . .	80
4.2.1.2	Nitrogênio Total . . . . .	85
4.2.1.3	Fósforo Total . . . . .	89
4.2.1.4	Oxigênio Dissolvido . . . . .	94
4.2.2	Transição Rio - Reservatório . . . . .	98
4.2.2.1	Rio Paranapanema - Jurumirim . . . . .	99
4.2.2.2	Rio Paranapanema - Chavantes . . . . .	102
4.2.2.3	Rio Paranapanema - Capivara . . . . .	104
4.2.2.4	Rio Itararé - Chavantes . . . . .	107
4.3	Cenários Futuros . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>130</b>
<b>6</b>	<b>Referências</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Tabela de Revisão Bibliográfica</b>	<b>141</b>

<b>B Disponibilidade de dados</b>	<b>151</b>
<b>C Dedução das Equações de Saint-Venant</b>	<b>155</b>
C.1 Equação da Continuidade . . . . .	155
C.2 Equação da Quantidade de Movimento . . . . .	156
C.2.1 Somatório de Forças em x . . . . .	158
C.2.1.1 Força de Pressão . . . . .	158
C.2.1.2 Força de Atrito . . . . .	160
C.2.1.3 Força da gravidade . . . . .	161
C.2.2 Somatória das Forças no Volume de Controle . . . . .	162
C.2.2.1 Termo 1 . . . . .	162
C.2.2.2 Termo 2 . . . . .	163
<b>D Pré-processamento de dados</b>	<b>165</b>
D.1 Geometria . . . . .	165
D.1.1 Seções HIDROWEB . . . . .	165
D.1.2 Modelo de Elevação de Terreno . . . . .	166
D.2 Simulações preliminares . . . . .	167
D.2.1 Resultados . . . . .	168

# 1 Introdução

*Nós esquecemos que o ciclo da água e o ciclo da vida são um só.*

Jacques Yves Cousteau

*Nature has introduced great variety into the landscape, but man has displayed a passion for simplifying it. Thus he undoes the built-in checks and balances by which nature holds the species within bounds.*

Rachel Carson, Silent Spring

O desenvolvimento de uma região é atrelado a uma série de consequências, passando pelo crescimento econômico e conservação ambiental. Enquanto o desenvolvimento de setores como a agropecuária, agricultura e indústria gera receita, esse mesmo desenvolvimento também gera impactos no meio ambiente: lançamento de agrotóxicos, fertilizantes, químicos e poluentes em geral, além de desmatamento e alterações no uso do solo. O equilíbrio entre os usos da terra e qualidade da água é um grande desafio, cuja solução recai na gestão de uso do solo e de recursos hídricos. Cada país escolhe suas políticas de gestão de uso recursos hídricos, de forma que melhor se encaixe em suas características e necessidades, sendo que no Brasil tem-se como base a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela lei 9433/97 (Brasil, 1997), que também apresenta alguns instrumentos, como o Enquadramento, detalhado na resolução CONAMA 357 (CONAMA, 2005).

A lei 9433/97 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que tem como objetivo garantir a disponibilidade e qualidade de água para as gerações atuais e futuras, introduzindo instrumentos para que esses objetivos sejam cumpridos. Entre esses instrumentos, estão as outorgas e o Enquadramento, que estabelece padrões de qualidade da água em corpos da água, cujas definições são definidas na resolução CONAMA 357 (CONAMA, 2005). Sua base são as classes para corpos de água superficiais, incluindo rios e reservatórios, que são definidas por concentrações limite para uma série de parâmetros. O rio deve estar em conformidade com a classe que garanta a qualidade da água para

seu uso mais exigente. O papel do gestor é garantir que essa condição seja cumprida, e planejar a gestão da bacia de forma que o rio continue a atender sua classe e seus usos mais exigentes no futuro.

A resolução CONAMA 357 (CONAMA, 2005) estabelece as concentrações limites para cada classe são avaliadas no cenário da vazão de referência, usualmente a vazão mínima de 7 dias de duração e tempo de recorrência de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ) ou aquela com tempo de permanência igual a 95% ( $Q_{95}$ ). Para os parâmetros nitrogênio e fósforo em suas formas químicas, pontua-se que suas concentrações podem ser superiores aos limites de classe, desde que decorrente de aumento na carga oriunda de fontes difusas ou condições naturais e não detrimental a qualidade da água no trecho. Essa variação pode ser fruto das variações nas vazões e aporte de poluentes no rio, não considerados na modelagem baseada em vazões de referência em regime permanente. Bacias hidrográficas tem comportamento dinâmico, influenciado pelo regime hídrico e alterações no uso do solo, melhor representados por modelos em regime não-permanente (Ferreira et al., 2016).

Estudos voltados a aplicações de modelagem na gestão apontam a importância de considerar as interações rio-reservatórios e a variação temporal. Tendo como área de estudo a bacia do Rio Tietê, Tercini and Mélo Júnior (2016) desenvolveram um modelo em regime permanente unidimensional, aplicado a 83 quilômetros de rio e quatro reservatório, considerando 12 cenários que variam o nível do reservatório, vazão de descarga e concentração de entrada de demanda biológica de oxigênio DBO. A conclusão obtida é que o reservatório tem grande influência nos processos dinâmicos associados aos parâmetros de qualidade da água à jusante do barramento, sendo influenciados pela carga de DBO afluente, nível do reservatório e vazão descarregada.

O impacto gerado pela carga de DBO afluente e nível do reservatório indicam a importância da modelagem que integre bacia, rios e reservatórios. Pesquisas voltadas para essa abordagem apontam os efeitos da urbanização e alterações de uso no solo nos rios da região, indicando que os impactos gerados pelas mudanças de uso de solo do crescimento urbano tem menor impacto nos corpos hídricos e equilíbrio da fauna que as alterações relacionadas a agricultura, agropecuárias e afins (Luo et al., 2020). Essa pesquisa também indicou resultados diferentes para as estações seca e úmida, com resultados piores para a estação seca (inverno), destacando a importância da consideração da variação temporal. Resultados simulares àqueles apresentados por Moura et al. (2013), que analisou a

distribuição de fitoplâncton ao longo do Rio Contas, rio controlado por uma série de reservatórios, também observando a redução na variação das concentrações dos parâmetros associados a qualidade da água, processo chamado de homogeneização, e aumento de algas durante o período seco.

Estabelecida a importância da relação entre alterações no uso de solo e qualidade da água, ressalta-se que as formas de integrá-las são avaliando os dados observados ou usando modelo. A pesquisa desenvolvida por da Silva et al. (2019) estudou os dados disponíveis para o Rio Jauru, entre os anos de 1990 e 2013, abrangendo inclusive a construção de um dos seis reservatórios do rio. Esse tipo de abordagem permitiu concluir relações de causa-consequência, como por exemplo a forma com que as características físicas dos reservatórios influenciam os parâmetros de qualidade da água, mas não permite simular cenários diferentes. Para a simulação de cenários diferentes requer-se o desenvolvimento de modelos em regime não permanente, como desenvolvido por Wang et al. (2016), que avaliou o impacto de projetos de represamento e desvio no transporte de água e poluentes para o Rio Hianjiang (China), e como esses impactariam a classificação do rio. Esse estudo também aponta a regularização das vazões, mas ao contrário dos outros indica que as obras de represamento e desvio implicariam em queda de qualidade da água, fazendo com que o Rio não atendesse mais os critérios mínimos de sua classe.

No que tange a união de modelagem em regime não-permanente e enquadramento, Ferreira et al. (2016) propõe o uso de curvas de permanência como alternativa a abordagens baseadas em vazões de referência, usando como base a bacia do Alto Iguaçu, na região de Curitiba. O estudo indicou a versatilidade da abordagem em regime não-permanente, trazendo melhor compreensão sobre a variação temporal das vazões e concentrações dos poluentes.

O desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água requer a solução de equações diferenciais parciais, cujo desenvolvimento é simplificado ao usar modelos como o HEC-RAS. Optou-se por aplicar o modelo HEC-RAS, por ser um programa de acesso público e extensivamente aplicado (Che and Mays, 2017; Vijay et al., 2017; Correia, 2018; Paiva et al., 2011). Adicionalmente, permite a inserção de barragens como condições de contorno e pode ser integrado com dados georreferenciados (GIS).

## 1.1 Evidências de interesse

Os estudos com tema integração rio-reservatório, descritos em mais detalhes no item 2 e expostos no apêndice A, tem três principais vertentes: (1) conduzir análise estatística dos dados observados, limitando as conclusões a relações causa-efeito da construção e operação das barragens, (2) modelagem em regime não-permanente do sistema, com foco na otimização da operação dos reservatórios e (3) Modelagem hidrológica e hidrodinâmica, com foco na geração de geometria usando Modelos Digitais de Elevação (MDE). Conclusões mais abrangentes poderiam ser obtidas com o desenvolvimento de modelos que englobassem os reservatórios em cascata e qualidade da água, permitindo avaliar situações além daquelas observadas e o efeito da interação das variáveis. Há estudos que mostram o processo e eficiência da modelagem de sistemas de reservatório em cascata, como demonstrado por da Silva et al. (2019) e Long et al. (2019).

Sob o ponto de vista de gestão de recursos hídricos, Ferreira et al. (2016) avaliaram a adição da variação temporal, na forma de curvas de permanência, como ferramenta de análise da qualidade da água e tomada de decisão. Esse tipo de análise é importante, pois adiciona uma nova perspectiva a representatividade da abordagem tradicional, baseada em vazões de referência e incapaz de representar variações temporais.

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é avaliar a aplicabilidade de modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água para os rios da união da Bacia do Paranapanema, como ferramenta adicional à gestão apoiando o Enquadramento, chamado aqui de Enquadramento Hidrodinâmico. A base dos modelos é o HEC-RAS, em região com série de 8 reservatórios em cascata. Adicionalmente, conduz-se simulação para cenários futuros com aumento no aporte de cargas, e avalia-se os efeitos da construção de barragens, tanto sob o ponto de vista da região de transição rio-reservatório quanto nos trechos a jusante de reservatórios.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver ferramentas computacionais para separação e processamento de dados, geração de mapas, gráficos tipo boxplot e curva de permanência, usando Python,

QGIS e Excel.

- Desenvolver simulação hidrodinâmica e de qualidade dos rios Paranapanema e Itararé no modelo HEC-RAS;
- Avaliar a aplicabilidade do Enquadramento Hidrodinâmico para a Bacia do Paranapanema;
- Avaliar impacto dos reservatório no fluxo à jusante usando curvas de permanência;
- Avaliar comportamento da região de transição de regime lótico para lântico (região de transição);
- Avaliar eficiência das equações de Saint-Venant e Advecção-Dispersão-Reação em representar reservatórios;
- Desenvolver simulações para cenários futuros representando aumento do aporte de cargas;

### 1.3 Abordagem Metodológica

De forma resumida, essa pesquisa foi desenvolvida seguindo os passos:

1. Obtenção dos dados – a partir do HIDROWEB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e Instituto Água e Terra (IAT);
2. Processamento – revisão dos dados obtidos de forma a separar aqueles necessários e padronizar sua formatação. Definição das estações a serem usadas como base da modelagem (condições de contorno do modelo hidrodinâmico, estações estrela para qualidade da água), criação da geometria a partir das seções transversais HIDROWEB e MDE;
3. Revisão bibliográfica: reservatórios em cascata, integração rio-reservatório, modelagem hidrodinâmica, modelagem de qualidade da água. Compilação dos dados principais em tabela (ver apêndice A);
4. Simulações hidrodinâmicas – aplicação do modelo HEC-RAS em regime não-permanente para a geometria gerada usando as seções transversais e obtidas a partir do MDE,

usando condições de contorno obtidas a partir dos dados observados para o ano 2012. Os resultados são avaliados ao longo do perfil longitudinal dos rios e em pontos com dados disponíveis para comparação, na forma de gráficos dos perfis, hidrogramas e curvas de permanência;

5. Simulações de qualidade da água – conversão das cargas difusas e pontuais geradas na bacia para concentrações de entrada ao longo dos trechos usados na representação de contribuição lateral da simulação hidrodinâmica. A calibração foi conduzida por tentativa e erro, visando aproximar a mediana das séries simuladas com aquela dos dados observados. Os resultados são comparados na forma de gráficos tipo boxplot e curvas de permanência, assim como avaliando a mediana das séries;
6. Análise final dos resultados: transição rio - reservatório e como o HEC-RAS representa as condições de qualidade da água no trecho; influência dos reservatórios em cascata e aplicações da modelagem em regime não-permanente na gestão, assim como a forma com que esses resultados podem auxiliar o gestor na tomada de decisão.



## 2 Fundamentação Conceitual

*No passado nada está irremediavelmente perdido, mas está tudo irrevogavelmente guardado.*

Viktor Frankl

A análise das pesquisas anteriores (apêndice A) mostra maior foco em aplicações de técnicas estatísticas para avaliação dos impactos do represamento em cascata, com o desenvolvimento de modelos em regime não permanente voltados para estudos de inundação e operação em tempo real dos reservatórios. O uso de Modelos Digitais de Elevações (MDE) é recorrente para auxiliar a determinação de características geométricas e, se associados a modelos chuva-vazão, pode auxiliar a contornar a baixa disponibilidade de dados fluviométricos, uso mais comum em estudos de inundação. O modelo HEC - RAS é frequentemente usado, mas tendo maior presença em estudos que envolvem modelagem hidrodinâmica do que em estudos voltados a gestão de recursos hídricos.

A síntese dessa revisão foi segmentada de acordo com a área de interesse: integração de modelos, gestão de recursos hídricos, modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água, e modelo HEC - RAS.

### 2.1 Integração Bacia, Rio e Reservatório

Baseando-se nos artigos que integram a modelagem (apêndice A), pode-se notar três eixos principais para a análise integrada de bacia, rio e reservatório: (1) Modelagem Integrada de Bacias Hidrográficas, (2) Integração Rio - Reservatório e (3) Reservatórios em Cascata.

#### 2.1.1 Modelagem Integrada de Bacias Hidrográficas

Uma aplicação de modelo integrado de bacia hidrográfica é descrito por Adams et al. (2010), que descreve o esforço de órgão do estado de Ohio (Estados Unidos) em desenvolver um modelo hidrológico e hidrodinâmico para prever cheias. A aplicação proposta mostra bons resultados (Adams et al., 2011) e a viabilidade de desenvolvimento de ferramentas em grande escala para simulação e monitoramento de rios usando HEC-RAS.

A aplicação de modelos que integram bacia e rios também é aplicada para contornar a falta dados fluviométricos, como proposto por Paiva et al. (2011). Os autores desenvolveram modelo hidrológico e hidrodinâmico com base em MDE, vindo do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para geração das seções transversais e geometria da planície de inundação. Essa conclusão complementa a de Fleischmann et al. (2019), que ressalta que a geração de seções transversais de rios baseado em MDEs é viável, mas com resultados inferiores a análises usando seções transversais medidas e erros que ainda precisam ser melhor estudados.

### **2.1.2 Integração Rio - Reservatório**

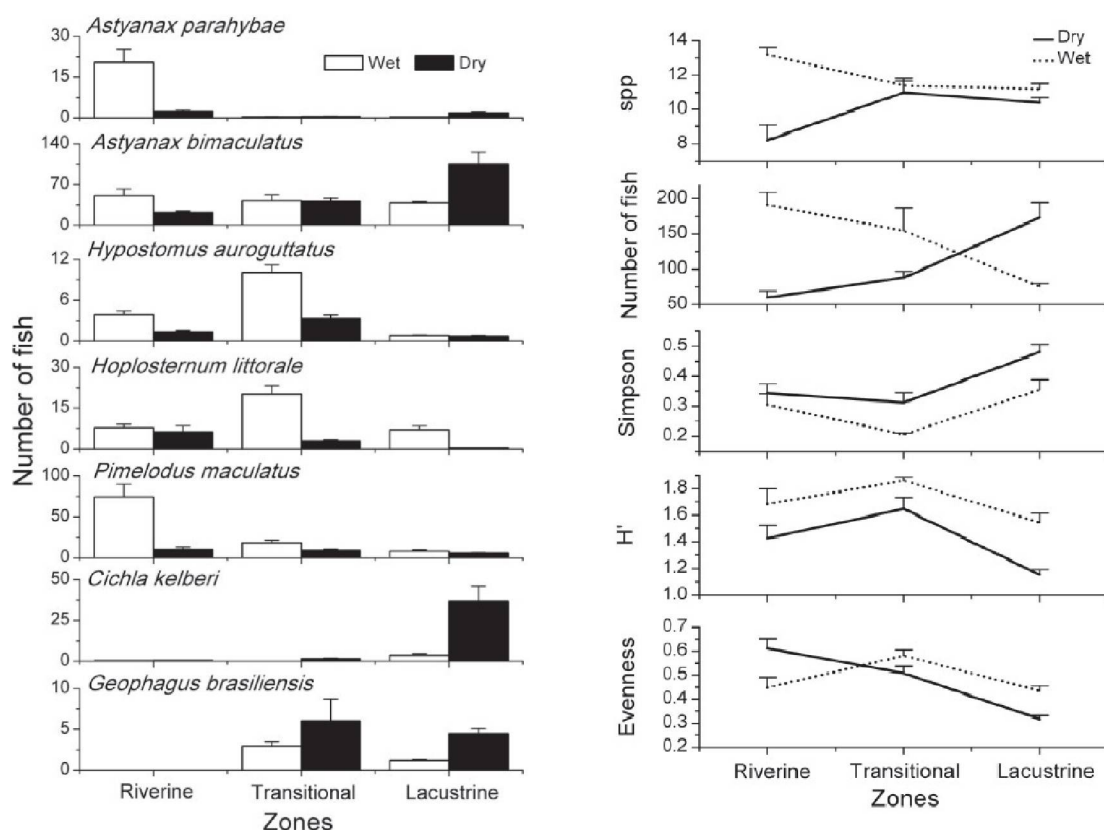
Essa área representa o trecho em que o escoamento do rio passa a ser afetado pelo reservatório, caracterizada pela redução da velocidade do escoamento e da prevalência do escoamento na direção longitudinal (1D). Essas são algumas das características de lagos e reservatórios, que segundo Esteves (1987), tem algumas diferenças: reservatórios apresentam maior instabilidade em seu ambiente pelas variações de nível, alterando tanto o ambiente aquático quanto o terrestre adjacente. Ao mesmo passo que podem ser usados para gerar energia, controlar cheias e armazenar água, podem trazer alterações negativas, como o aumento da evapotranspiração, elevação do lençol freático, inundação de áreas, aumento da taxa de sedimentação à montante, aumento na concentração de macrófitas e decorrente aumento na possibilidade de ocorrência de processos de eutrofização. Espera-se que a região de transição entre eles seja um ambiente com características próprias, misturando parte dos atributos do rio e parte do reservatório.

Sob o ponto de vista de qualidade da água, Tercini and Mélo Júnior (2016) propuseram fazer a integração rio-reservatório usando as equações de Streeter-Phelps para simular OD e DBO, usando dados observados como base para as informações de escoamento. A área de estudo é um trecho de 83 km do Rio Tietê, que inclui 4 reservatórios, com simulações para doze cenários, compreendendo condições diferentes de carga afluenta de DBO, vazão de descarga e nível do reservatório de Pirapora. Seus resultados indicam o aumento na concentração dos poluentes ao longo do rio, o que se traduz como os efeitos dos reservatórios em reter poluentes, e em melhorar os níveis de qualidade da água nos trechos a jusante. Os autores concluíram que as variáveis com maior impacto nos parâmetros de qualidade da água são: carga afluenta de DBO, nível do reservatório e

vazão descarregada.

Uma análise com foco na fauna é apresentado por Santos et al. (2010), que avaliaram a distribuição de fauna ao longo do gradiente de transição longitudinal rio - reservatório, tendo como área de estudo o rio Paraíba do Sul e o reservatório Funil. Foram coletadas amostras nos trechos de rio, transição e reservatório, então comparando-se a distribuição de espécies entre essas zonas nas estações seca e úmida, resultados ilustrados na Figura 1. Concluiu-se que o regime hídrico interfere diretamente na quantidade de indivíduos, com o rio tendo maior diversidade na estação úmida, e o oposto na seca. O autor também indica que a região de transição abriga a maior diversidade e quantidade de espécies observadas, indicando que espécies de ambientes lóticos e lênticos podem conviver e o papel importante que esse trecho representa.

Figura 1: Na esquerda: distribuição de fauna ao longo do rio, transição rio-reservatório e reservatório. Na direita: riqueza (ssp), número de peixes, Diversidade (Shannon -  $H'$ ) e uniformidade.



FONTE: Santos et al. (2010).

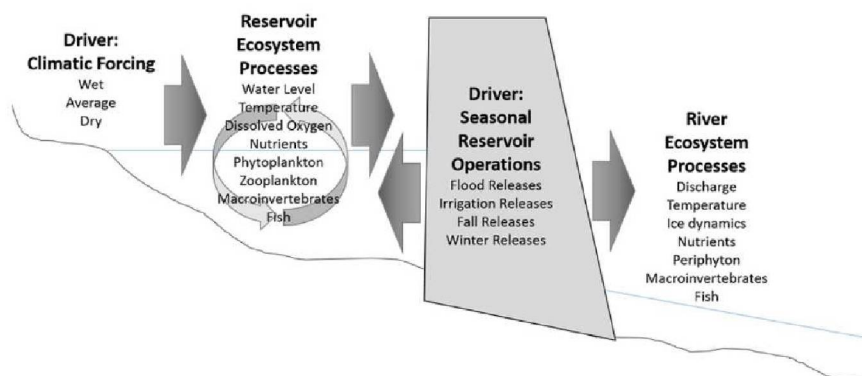
### 2.1.3 Reservatórios em cascata

Por alterar a geometria do corpo hídrico, tanto do rio como das seções alagadas pelo reservatório, e regular a quantidade de água escoando, os reservatórios têm grande potencial de impacto no escoamento e qualidade da água nos trechos a jusante. Em casos com reservatórios em cascata, a avaliação desse impacto é de maior complexidade, dado o impacto de cada reservatório nos trechos de rio e reservatórios subsequentes.

A modelagem de um sistema de reservatórios em cascata é conduzida no trabalho de Cunha-Santino et al. (2017), que avaliaram o impacto de uma série de 6 reservatórios na bacia do Rio Juquiá-Guaçu, usando modelo 0D e simulando 23 variáveis. A análise é baseada em 16 pontos de coleta, permitindo avaliar o comportamento das concentrações das variáveis em vários pontos para cada reservatório. Os resultados indicaram a capacidade dos reservatórios em acumular a maiorias dos poluentes, mas com intensidade variada entre os parâmetros e reservatórios. Destaca-se que os parâmetros mais afetados são aqueles relacionados à sedimentação, e que aqueles dependentes de erosão e escoamento quase não são afetados pelos reservatórios, complementando os resultados apresentados por da Silva et al. (2019), mas que adiciona como impacto a redução nas concentrações médias de OD.

Com foco no transporte de fósforo ao longo de um sistema de reservatórios em cascata, Chen et al. (2019) desenvolve um sistema acoplado de operação multiobjetivo baseado no balanço de massa dinâmico de fósforo total. Seus resultados indicam que os reservatórios maiores são muito mais eficientes em reter fósforo, mas que as regras de operação influenciam bastante nesse potencial. Os autores concluíram que quando a exportação de fósforo dos reservatórios é incorporada como objetivo da operação, prejudica-se a geração de energia. Conclusões similares são obtidas por Tranmer et al. (2020) e Chen et al. (2019), que destacam em seus estudos a importância de equilibrar os interesses dos reservatórios com os de trechos a jusante de rio, que frequentemente são contrários.

Figura 2: Variáveis envolvidas na análise de sistemas rio - reservatório.



FONTE: Tranmer et al. (2020)

É esperada que construção de reservatórios tenha impacto no regime de vazões e variação de parâmetros de qualidade da água, efeitos estudados por Poff et al. (2007). Os autores estudaram rios de médio e grande porte dos Estados Unidos, concluindo que as represas causam efeitos de homogeneização das vazões, principalmente através da modificação dos eventos de cheia e seca, característica que não foi observada em nenhum dos rios sem reservatórios. O autor destaca que existe uma represa para cada 48 km de rio de médio e grande porte, alagando cerca de 10% do comprimento total de rios no país, argumentando que as represas podem ter impacto em escala continental na regularização das vazões. Essas alterações implicam em mudanças no equilíbrio aquático, alterando as condições de qualidade da água e criando ambientes que desfavorecem algumas espécies nativas.

Visando avaliar os efeitos do represamento em trechos de rio a jusante e projetos de desvio, Wang et al. (2016) fizeram a modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água para a região do Rio Hianjiang, na China. Seus resultados indicam redução na velocidade e vazão média do rio, com aumento no nível d'água e recarga no aquífero. As simulações de qualidade da água indicaram concentrações mais altas de poluentes após o represamento e projetos de desvio para todos os cenários, comprometendo o uso da água para seus usos mais exigentes. Nota-se que os resultados apontados por Wang et al. (2016) divergem do esperado e normalmente apresentados por outros autores, cujos resultados tendem a classificar o efeitos dos reservatórios como positivos para qualidade da água (Tercini and Mélo Júnior, 2016).

Outra motivação para a operação integrada de reservatórios em cascata é reduzir os impactos no meio ambiente (Poff et al., 2007; Wang et al., 2016), análise conduzida por Wang et al. (2018). Tendo o Rio Han, na China, como área de estudo, o autor desenvolve o conceito de “operação ecológica”, aliada a operação tradicional. Seus resultados indicam que é viável implantar a operação, aliando os interesses do uso humano com a conservação do rio. Visando avaliar o efeito da descarga de reservatórios, a pesquisa conduzida por Chung et al. (2008) se baseou na descarga de vazões entre 30 e 200 m<sup>3</sup>/s durante 6 horas como base para o experimento. Os autores usaram como base a barragem de Daechong, na Coréia do Sul, e concluiu que o efeito da descarga varia de acordo com o parâmetro, sendo eficiente em reduzir as concentrações das frações de nitrogênio e fósforo, mas aumentou as concentrações de matéria orgânica e DBO. O autor cita como desafios desse tipo de modelagem a representação da ressuspensão da matéria orgânica.

Os reservatórios mostram uma tendência a acumular nutrientes, regularizar vazões e a serem operados de forma a otimizar sua eficiência em gerar energia, de maneira desequilibrada com os interesses dos trechos a jusante de rios ou outros reservatórios. Os estudos indicam o efeito disso no meio aquático, assim como formas de operar de maneira mais sustentável, atendendo melhor aos interesses da qualidade da água dos rios, reservatórios e vida aquática.

## **2.2 Gestão de Recursos Hídricos**

A lei 9433/97 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que tem como objetivo garantir a disponibilidade e qualidade de água para as gerações atuais e futuras, trazendo instrumentos para tal e definindo alguns fundamentos quanto a água do território nacional, entre eles: bem de domínio público, recurso limitado e dotado de valor econômico, cuja gestão deve proporcionar vários usos. Também define que a responsabilidade de aplicar a política fica a cargo da bacia, devendo ser descentralizada e contar com a participação do poder público, usuários e comunidade. Entre os instrumentos, destaca-se para esse estudo: planos de recursos hídricos – planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da PNRH, outorgas – que visam controlar o uso da água para garantir sua disponibilidade, e o enquadramento. Este tem como objetivo definir classes para os rios, que devem ser atribuídas de forma a garantir que a qualidade da água do rio seja suficiente para seu uso mais exigente, além de diminuir custos de combate à poluição

com ações preventivas (Brasil, 1997).

As classes de rio e e diretrizes para enquadramento são apresentados pela resolução CONAMA 357 (CONAMA, 2005). Essa separa os corpos hídricos por tipo, como água doce, salina e salobra, ambientes lóticos e léticos; além de apresentar as classes para cada tipo. Cada classe define valores limite para uma série de parâmetros, cujos valores devem ser obedecidos nas condições de vazão de referência. A resolução também indica que possíveis interações entre os parâmetros devem ser observadas, não podendo causar alterações no comportamento do ecossistema local, assim como alterar os usos preponderantes previstos.

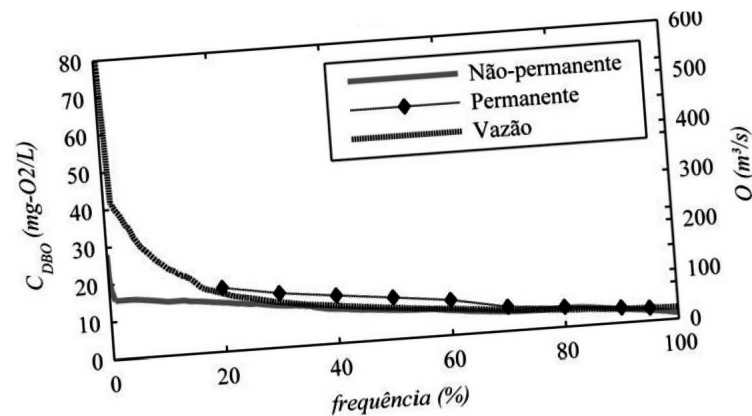
Concentrações limites para cada classe são avaliadas no cenário da vazão de referência. A interpretação desse termo fica a critério da equipe responsável pela análise, sendo que os valores tradicionalmente são os chamados  $Q_{7,10}$  (vazão mínima de 7 dias de duração e tempo de recorrência de 10 anos) e  $Q_{95}$  (vazão com tempo de permanência igual a 95%). Essa abordagem simula uma situação frequente e que não considera a variação temporal de vazões e aportes de poluentes, características do método que implicam em menor tempo computacional. Cenários atípicos são contemplados pela resolução para os parâmetros de nitrogênio e fósforo, permitindo que os valores máximos admissíveis sejam alterados em duas situações: em decorrência de condições naturais, ou quando estudos que considerem a poluição difusa comprovarem que esse novo limite não acarrete prejuízos aos usos previstos no enquadramento (CONAMA, 2005).

Estudos anteriores apontam que bacias tem comportamento dinâmico, influenciado por característica do uso da terra e regime hídrico, que seriam melhor representados por modelos em regime não-permanente (Ferreira et al., 2016). Essa dinâmica é intensificada em cenários urbanos e com rios controlados por reservatórios. Fica evidente que estes aspectos, que interferem diretamente na dinâmica de transporte de constituintes, podem ter um impacto significativo nas estratégias de implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos. Os autores simulam um trecho de 90 km do Rio Iguaçu em regime permanente e não-permanente, aplicando a equação advecção-dispersão-reação (ADR) para qualidade da água (Ferreira et al., 2015).

Entre os resultados de Ferreira et al. (2016), tem-se curvas de permanência para alguns pontos selecionados, permitindo comparar os resultados apresentados por cada abordagem e sua eficácia, ilustrados na Figura 3 para o parâmetro DBO, no ponto IG5,

quase na exutória da bacia. Os resultados permitem comparar os resultados das abordagens em regime permanente e não-permanente, destacando a convergência das simulação em vazões mais altas e com níveis de qualidade da água mais elevados, e a flexibilidade do modelo hidrodinâmico em simular situações mais críticas e com vazões mais baixas. Destaca-se também o impacto das variações de velocidade nas taxas de reaeração, a sensibilidade envolvida na calibração do oxigênio dissolvido e erros devidos a difusão numérica. Os autores concluíram que o melhor detalhamento temporal viabilizado pela modelagem em regime não-permanente permite entender melhor o comportamento de poluentes em rio, com possíveis aplicações na gestão.

Figura 3: Comparação de simulações de qualidade da água baseadas em regime permanente e não permanente.



FONTE: Ferreira et al. (2016).

## 2.3 Escoamento em Rios

O escoamento em canais abertos é definido pela sua superfície superior livre, sendo que sua representação matemática é a propagação de ondas, que simula os efeitos que as forças atuantes no trecho avaliado têm no escoamento. A solução desse problema, baseada na solução das equações de Saint-Venant (capítulo 3.2) requerem a geometria desse canal e de referências de entrada e saída de quantidade d'água, formalmente chamadas de condições iniciais e de contorno. Entre as condições de contorno, existe a representação da contribuição lateral, termo "q" na equação da continuidade (capítulo 3.2, equação 1), caracterizando as entradas e saídas de água ao longo do rio. Em seu estudo, Ahmed et al. (2009) cita alguns exemplos dessas transferências:



- Escoamento superficial causado pela chuva;
- Carga e descarga de aquífero;
- Pontos de retirada de água para consumo humano;
- Despejo das redes de captação de águas fluviais (drenagem);
- Despejo de esgoto e de estações de tratamento de esgoto.

A estimativa dessas contribuições pode ser feita de várias formas, incluindo a relações chuva-vazão (Passaia et al., 2020; Che and Mays, 2017; Pontes, 2016), que em sua maioria usam os modelos HEC-HMS (40% da biografia utilizada nesse estudo e que modelou a bacia hidrográfica - ver anexo A), seguidos dos modelos *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT - 13%) e Modelo de Grandes Bacias (MGB - 13%). O desenvolvimento desse tipo de modelo é complexo, e a necessidade de seu uso depende do escopo do trabalho, sendo mais usado em estudos que avaliam cargas difusas (Ferreira et al., 2018; Morales-Marín et al., 2017) ou aplicações de larga escala (Pontes, 2016; Paiva et al., 2011; Passaia et al., 2020). Outra metodologia para definição das contribuições laterais é a diferença entre hidrogramas observados, aplicada por Ferreira et al. (2016), que desenvolveu modelo hidrodinâmico e de qualidade da água para o Rio Iguaçu, na região da bacia do Alto Iguaçu, obtendo resultados considerados satisfatórios. O estudo conduzido por Fernandes et al. (2019b) aplica a mesma metodologia, mas na bacia do Paranapanema, distribuída em 8 trechos, também obtendo resultados satisfatórios.

## 2.4 Qualidade da Água

A modelagem de qualidade da água no HEC-RAS é estudada no trabalho proposto por Zhang and Wu (2013), que avalia as relações uso de solo-qualidade da água para a bacia do alto do Rio Mississipi. Com série de dados que abrangem 18 anos e usando os modelos SWAT e HEC-RAS, o autor indica a capacidade das simulações de qualidade da água em replicar o comportamento observado. Conclui ressaltando que seu modelo de qualidade da água desenvolvido no HEC-RAS pode ser usado para avaliar mudanças no uso de solo nas concentrações de poluentes no rio no futuro.

A interação entre parâmetros é complexa e difícil de ser modelada, mesmo com grande disponibilidade de dados, o que leva a desenvolvimento de modelos que geral-

mente simulam DBO, OD, e frações de nitrogênio e fósforo (Fan et al., 2009; Tercini and Mélo Júnior, 2016; Vijay et al., 2017), variáveis representativas da qualidade de água e para avaliar o impacto da poluição por matéria orgânica e nutrientes. Para esse estudo, simulou-se a qualidade de água através dos parâmetros DBO, OD, NT e PT.

## 2.5 HEC-RAS

O desenvolvimento de programas para solucionar as equações de Saint-Venant permite flexibilidade, especialmente sob o ponto de vista de escolha do método numérico utilizado, mas também sobre como a ferramenta interpreta as condições iniciais e de contorno. Essa flexibilidade, entretanto, é atrelada ao desenvolvimento de programas razoavelmente complexos, que devem ser capazes não só de resolver as equações diferenciais, mas também de ler e interpolar uma série de dados e exportar os resultados de forma inteligível. Esse processo pode ser interessante para determinadas casos, como proposto por Ferreira et al. (2015), que tinha entre os objetivos avaliar a viabilidade do uso do método difusivo de LAX para solução das equações de Saint-Venant.

No caso desse estudo, o objetivo geral é avaliar a possibilidade de uso de modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água como ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos. É interessante que o modelo aplicado seja simples de ser reaplicado no futuro, mesmo que por equipe diferente, e é sob esse ponto de vista que o uso do HEC-RAS se mostra interessante: o fato de ser um programa computacional gratuito, compatível com simulações conduzidas em versões antigas (USACE, 2016) e amplamente utilizada (Che and Mays, 2017; Vijay et al., 2017; Correia, 2018; Fleischmann et al., 2019). Destaca-se também a integração com dados georreferenciados (SIG), utilizado nesse trabalho, e modelo de bacia HEC-HMS (Scharffenberg, 2016), não aplicado nesse estudo mas com resultados promissores para simulações de chuva - vazão integradas ao HEC-RAS (Pinto and de Souza, 2019).

Uma das características da bacia do Paranapanema é a junção de seus rios, Itararé e Paranapanema. A união deles poderia ser feita por trechos, considerando as vazões de saída do Rio Itararé como condição de contorno interna do Rio Paranapanema, mas essa abordagem iria contra a premissa do trabalho de integrar as simulações. Baseando-se no estudo conduzido por Kane et al. (2017), optou-se por usar o método EWS (*Equality of Water Surface*), que iguala o nível d'água nos pontos de entrada e saída da junção.

## 2.6 Síntese do Capítulo

A avaliação dos estudos nos tópicos de modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água, voltados para modelagem integrada de rios e reservatórios, mostra os desafios envolvidos no processo. Destaca-se a dificuldade em representar os fenômenos de transporte e transformação de poluentes na água, limites analíticos das medições, impacto da operação de reservatórios a jusante e sua relação com a operação, além de metodologias para contornar a falta de dados. O resumo dos trabalhos é apresentado na tabela 1, com a análise completa no apêndice A.

Tabela 1: Resumo da tabela de revisão com os principais artigos no tema integração rio-reservatório.

Autor	Síntese do Trabalho	Variáveis Avaliadas
Tercini; Mélo Júnior (2016)	Desenvolve simulação de OD e DBO integrando rios e reservatórios	OD, DBO
Wang et al. (2016)	Propõe um modelo hidrodinâmico 1D com modelo de qualidade da água para analisar os efeitos de projetos atuais e futuros de desvio de água	COD, NH <sub>4</sub> , TP
Long et al. (2019)	Propõe um modelo hidrodinâmico 1D com modelo de qualidade da água para analisar os efeitos dos projetos atuais e futuros de desvio de água e represamento	Vazão e temperatura
Che; Mays (2015)	Desenvolve e testa uma metodologia para operação de reservatório antes, durante e após eventos de inundação em tempo real	Nível, Vazão

*Continua na próxima página*

Autor	Síntese do Trabalho	Variáveis Avaliadas
Cunha-Santino; Fushita; Bianchini (2017)	Com base em modelo de 0D, este trabalho descreve o balanço de massa de 23 variáveis limnológicas em um sistema de 6 reservatórios em cascata..	DO, pH, TS, COD, Alkalinity, TC, DIC, DOC, TP, TDP, TPP, N-NO3, N-NO2, N-NH4, N-Org, TIN, TN
Chen et al. (2019)	Desenvolve modelagem com foco em operação de reservatórios em cascata. A abordagem acopla a otimização da operação de reservatório multiobjetivo com cálculo de balanço de massa dinâmico de PT	PT
Morales-Marín (2017)	Identificação das principais fontes de nutrientes e modelagem da exportação de nutrientes da bacia hidrográfica em diferentes escalas espaciais	NT, PT
Wan et al. (2018)	Analisa o impacto da operação do reservatório nas cheias a jusante. A área de estudo inclui vinte reservatórios em cascata, que impactam entre si as inundações	Nível
Wang et al. (2018)	Regras de operação afetam diretamente os trechos a jusante, geralmente focando na maior eficiência ao gerar energia. O autor investiga uma abordagem alternativa, baseada em regras de orientação ecológica que, apesar de ser menos eficiente, pode ser conciliada com a operação tradicional para reduzir os impactos no equilíbrio ambiental a jusante	Nível, qualidade da água

*Continua na próxima página*

Autor	Síntese do Trabalho	Variáveis Avaliadas
Duan et al. (2016)	O autor compara dados observados com a descarga natural simulada, para avaliar o nível de alteração do rio. Usando a propagação do escoamento de Muskingum e diferentes indicadores de alterações hidrológicas, conclui que os reservatórios induzem fortemente alterações hidrológicas na área estudada	Nível
Santos; Terra; Araújo (2010)	O autor desenvolve uma análise crítica sobre a quantidade e distribuição de peixes no rio, reservatório e região de transição. Conclui que esta área mistura características de rio e reservatório, mas com comportamento próprio e único	-

FONTE: Adaptado de Becker and Ferreira (2020).

### 3 Materiais e Métodos

*Um processo não pode ser compreendido parando-o. O entendimento deve se mover com o processo, se unir a ele e fluir junto.*

Frank Herbert, Duna

*A teoria é frequentemente frustrante, pois se aplica principalmente a situações idealizadas que podem ser inválidas em problemas práticos.*

Frank White, Fluid Mechanics

Essa pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o impacto do aporte de cargas de poluentes da bacia do Paranapanema em seus rios federais, com foco em criar ferramentas adicionais à gestão que considerem variações temporais. Como essa abordagem envolve a avaliação do transporte e transformação de poluentes ao longo do tempo e espaço, necessita-se do desenvolvimento de simulações hidrodinâmica e de qualidade da água, baseadas nas equações de Saint-Venant e ADR, respectivamente. Para solução dessas equações, é necessária representação da geometria do canal, condições iniciais e de contorno, para a parte hidrodinâmica e em seguida para qualidade da água. Para solução do problema, optou-se por usar o modelo HEC-RAS (USACE, 2016). As fontes de dados são (Fernandes et al., 2019b):

- HIDROWEB: banco de dados gerido pela ANA, do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) que oferece acesso aos dados presentes na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN):
  - Dados de estações pluviométricas, fluviométricas, sedimentológicas e de qualidade da água em todo o território nacional. O download dos dados das estações inseridas na bacia do rio Paranapanema foi feito em julho/2019. Disponível em <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo): Agência ambiental do

Governo do Estado de São Paulo, responsável pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento de atividades geradoras de poluição:

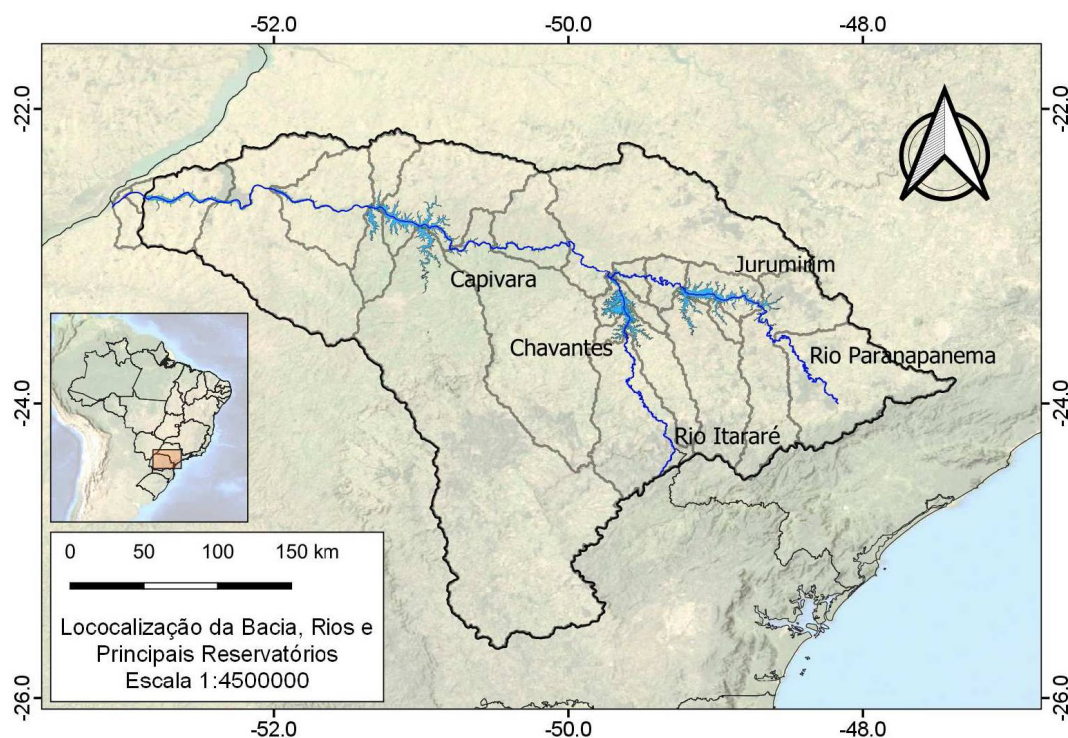
- Dados de qualidade da água da região da bacia que se encontra no estado de São Paulo. Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/>.
- DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica): Órgão gestor dos recursos hídricos do Estado de São Paulo:
  - Dados de chuva, vazão, nível, seções transversais e resumos de descarga da região da bacia que se encontra no estado de São Paulo.

Os dados de diversas fontes foram necessários para garantir a redução de falhas e disponibilidade dados mais recentes, visto que nem todos os órgãos que coletam dados pluviométricos e de qualidade da água tem seus dados integralmente disponíveis no sistema, além do sistema em si nem sempre ter os dados atualizados. Todos os dados referentes ao estado do Paraná estavam disponíveis no HIDROWEB. A lista completa com os dados disponíveis de cada estação, assim como o método aplicado para compatibilização dos dados, é apresentada no apêndice B.

### **3.1 Caracterização dos Rios Paranapanema e Itararé**

A Bacia do Rio Paranapanema tem área de 100.800km<sup>2</sup> e engloba dois rios de domínio da União: Rio Paranapanema e Rio Itararé, além de 247 municípios, 115 no Estado de São Paulo e 132 no Estado do Paraná, totalizando 4,28 milhões de habitantes. Em relação ao país, esses dados representam 1,2% da área, 2,3% da população e quase 2% do PIB, o que mostra sua importância no contexto socioeconômico brasileiro (ANA, 2016). A posição da bacia no país e seus rios, que dividem os estados Paraná e São Paulo, são ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Localização da Bacia do Paranapanema, rios Paranapanema e Itararé, três reservatórios de grande porte e UGHs.



FONTE: O autor (2021).

A altimetria varia entre 1363m, na região mais ao sul, e 185m na foz do Rio Paranapanema. A precipitação média entre 1975 e 2012 foi de 1.450 mm, com valores mais elevados ao sul e inferiores a leste e noroeste, estando sujeito a impactos por ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña, quando mais intensos. A época mais seca é a de junho a agosto e a mais úmida de dezembro a janeiro, estando sujeita a períodos de secas e estiagem, assim como de enchentes e inundações. Os maiores usos da terra são pastagens, florestas e culturas temporárias de milho e soja (ANA, 2016).

O Rio Paranapanema tem 910 quilômetros de comprimento, nascendo na Serra dos Agudos e com Foz no Rio Paraná, sendo permeado por reservatórios. O Rio Itararé tem 220 quilômetros, nascendo na Serra de Paranapiacaba e com foz no Rio Paranapanema, no reservatório de Chavantes (ANA, 2016).

As usinas hidrelétricas na calha do Rio Paranapanema, de montante para jusante, são: Jurumirim, Piraju, Paranapanema, Chavantes, Ourinhos, Salto Grande, Canoas II, Canoas I, Capivara, Taquaruçu e Rosana. Suas construções alteram o escoamento natural do rio, assim como do Rio Itararé e de seus afluentes. Desses reservatórios, três tem suas



vazões reguladas por comportas e tempo de residência elevado, com mais de 40 dias: Jurumirim, Chavantes e Capivara, representados na Figura 4, os demais são a fio d'água (Fernandes et al., 2020a, 2019a). A análise de qualidade da água apresentada no Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) indica que os rios tem bons níveis de qualidade da água, dentro dos limites de classe 2 na maior parte da bacia (ANA, 2016).

### 3.2 Escoamento Não - Permanente em Canais Abertos

Para representar as variações temporais do escoamento em canais abertos, usa-se as equações de Saint-Venant, propostas por Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant em 1871 (Liggett and Cunge, 1975). Sua dedução é baseada nas seguintes hipóteses e premissas (Liggett and Cunge, 1975; Krylova et al., 2017):

- O comprimento do corpo hídrico é muito maior que sua profundidade e largura (escoamento 1D na direção longitudinal);
- Traçado do leito reto, sem curvas e não sujeito a forças centrífugas;
- As pressões dentro da água obedecem as leis da hidrostática, sem aceleração vertical;
- A seção transversal da superfície é horizontal;
- A inclinação do fundo é pequena, de forma que seu seno possa ser considerado igual a sua tangente;
- Fluido incompressível.

As equações, deduzidas no apêndice C, também conhecida por Equação de Águas Rasas (*Shallow Waters Equations*) são compostas pelas Equações da Continuidade (equação 1) e Equação da Quantidade de Movimento (equação 2), apresentadas na formulação usada pelo HEC-RAS para escoamento na direção longitudinal 1D (USACE, 2016).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial UQ}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (2)$$

Onde:

- t    Tempo - [s];
- Q    Vazão - [m<sup>3</sup>/s];
- A    Área da seção transversal - [m<sup>2</sup>];
- q    Contribuição lateral por unidade de distância - [ m<sup>3</sup>/s.m];
- g    Aceleração da gravidade - [m/s<sup>2</sup>];
- S<sub>f</sub>   Inclinação da linha de energia - [-];
- U    Velocidade - [m/s];
- z    Elevação da superfície livre- [m].

Sendo que o termo  $S_f$  representa o atrito com o fundo do canal, representado pela equação de Manning (equação 3). A elevação da superfície da água,  $z$ , é igual a  $z_0 + h$  (equação 4).

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{R^{4/3}A^2} \quad (3)$$

Onde:

- R    Raio Hidráulico - [m];
- n    Coeficiente de rugosidade de Manning - [m<sup>-1/3</sup> s].

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (4)$$

Essas equações diferenciais são hiperbólicas e não lineares, portanto, sem solução analítica e requerendo métodos numéricos para tal. Esses métodos envolvem transformar as equações diferenciais em expressões algébricas, transformando as derivadas em diferenças finitas, mas também podendo ser volumes finitos, elementos finitos, método das características, entre outros. O desenvolvimento dessas ferramentas computacionais envolve formulações matemáticas complexas, cuja natureza não-exata implica em erros de aproximação e de estabilidade (Ferreira et al., 2017). Esses desafios são intrínsecos a solução de equações diferenciais, mas a fase de desenvolvimento do modelo hidrodinâmico pode ser contornada usando modelos como o HEC-RAS, um modelo de escoamento fluvial descrito pelas equações de Saint-Venant, e usado nessa pesquisa. O modelo HEC-RAS

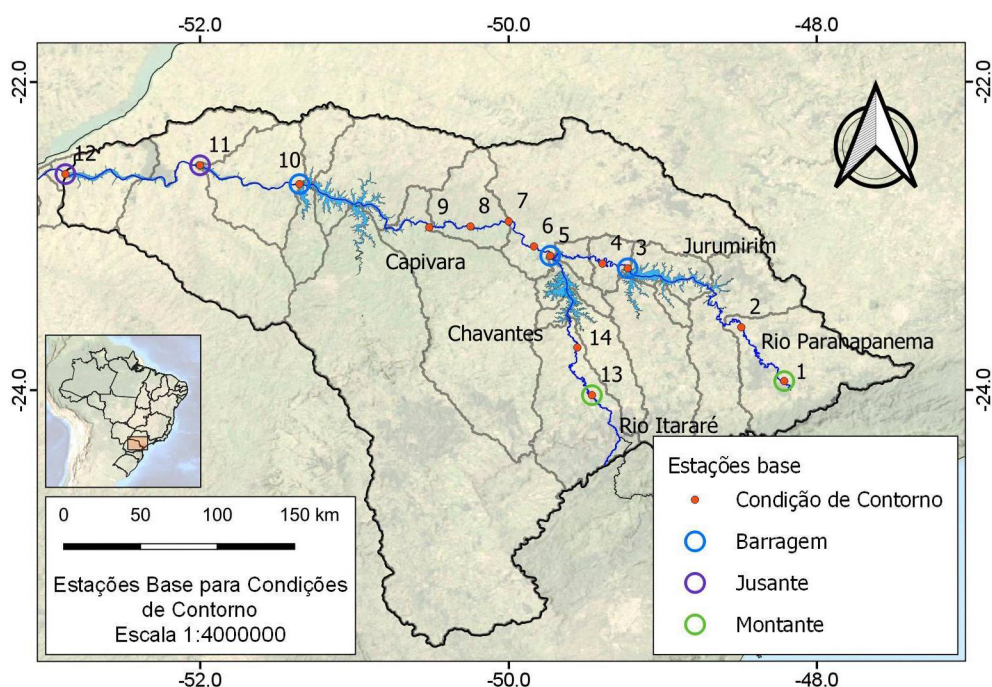
soluciona as equações de Saint - Venant usando o esquema numérico de diferenças finitas implícito de 4 pontos, conhecido como *box scheme* (USACE, 2016).

É possível desenvolver a modelagem em duas dimensões, usando as equações de Saint-Venant em 2D, também disponíveis no HEC-RAS. Essa aplicação é sugerida quando a contribuição lateral da água e dispersão dos poluentes é um fator de destaque. Alguns exemplos citados por Jeppson (2010) são: a água se espalhando pelos campos após uma ruptura de barragem, um rio que descarrega em uma região excepcionalmente plana ou estuária, e fluxo entrando em uma lagoa de tratamento. Para os objetivos dessa pesquisa, assume-se que a abordagem unidimensional representa de maneira adequada os problemas hidrodinâmico e de qualidade de água, dado que a dispersão de poluentes ao longo das seções transversais não é parte do escopo.

### **3.3 Dados de Entrada**

Os dados de entrada abrangem a geometria do canal, condições iniciais e de contorno. Usou-se a vazão do primeiro dia do ano como condição inicial. As estações HI-DROWEB com dados de vazão disponíveis para 2012, usadas como base para as condições de contorno e comparação dos resultados, são ilustradas na figura 5.

Figura 5: Mapa das estações com vazões diárias observadas para o ano de 2012 e base para as condições de contorno. Os números correspondem aos códigos de estação: 1 – 64005000; 2 – 64080000; 3 = 64215080; 4 = 64220050; 5 = 64270080; 6 = 64278080; 7 = 64332080; 8 = 64345075; 9 = 64345080; 10 = 64516080; 11 = 64535080; 12 = 64571100; 13 = 64231000; 14 = 64247000.

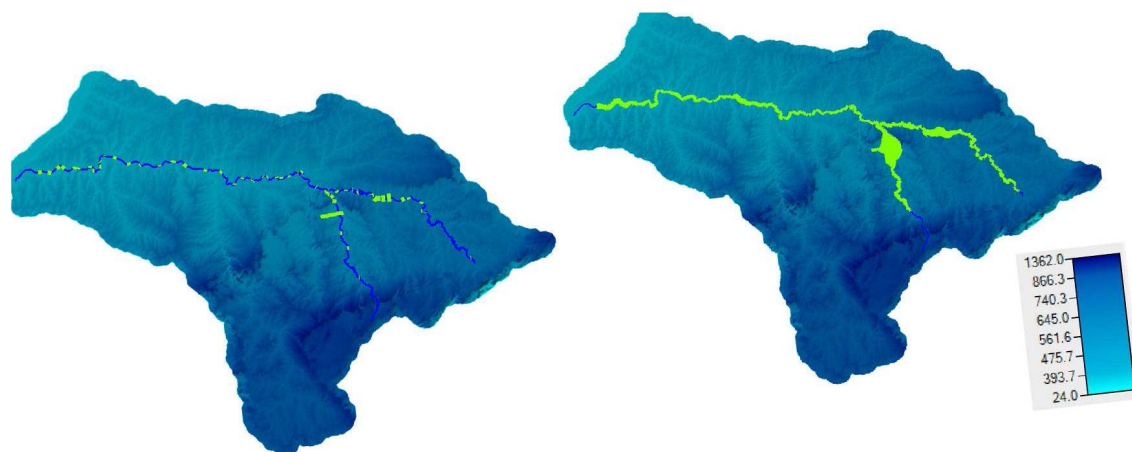


FONTE: O autor (2021).

### 3.3.1 Geometria

A geometria é baseada em 77 seções transversais, 8 vindas do HIDROWEB e 69 geradas a partir das batimetrias dos reservatórios, interpoladas linearmente em intervalos de 250 metros. O traçado dos rios foi criado usando *shapefile* dos rios e a ferramenta RAS Mapper do HEC-RAS (Scharffenberg, 2016). A vista superior das seções transversais antes e depois da interpolação são apresentadas na Figura 6. Em verde, tem-se a posição e largura das seções transversais, a linha azul é o eixo dos rios e a escala de azul ao fundo representa as elevações do terreno. Nota-se que os trechos de rio sem seções transversais, nas partes mais a montante e jusante dos rios, não são simulados. O processo de geração do MDE é descrito no apêndice D.

Figura 6: Em verde, esquema das seções transversais, na linha azul o eixo dos rio e na escala de azul, as elevações do terreno. A esquerda, mapa com a largura e posição das 77 seções transversais originais, e a direita o mapa com as seções transversais interpoladas linearmente a cada 250 metros.

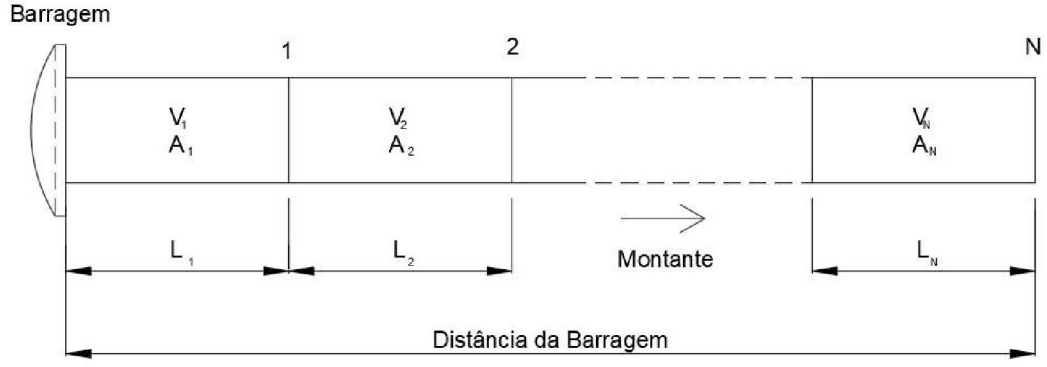


FONTE: O autor (2021).

Uma das características da bacia do Paranapanema é a junção de seus rios, Itararé e Paranapanema. A união deles poderia ser feita por trechos, considerando as vazões de saída do Rio Itararé como condição de contorno interna do Rio Paranapanema, ou adicionando a junção a geometria. Optou-se por trabalhar com a junção e, baseando-se no estudo conduzido por Kane et al. (2017), optou-se por usar o método EWS (*Equality of Water Surface*), que iguala o nível d'água nos pontos de entrada e saída da junção.

### 3.3.2 Tempo a Percorrer até a Barragem

O tempo a percorrer até a barragem, ou tempo de residência por seção transversal, é calculado a partir dos resultados do HEC-RAS, usando o esquema ilustrado na Figura 7, e as equações 5 a 8. Esse dado é usado para definir a região de transição e limites do rio e reservatório



FONTE: O autor (2021).

Figura 7: Esquema das células computacionais do modelo hidrodinâmico, com nomenclatura usada para cálculo do tempo a percorrer até a barragem.

$$V_n = \frac{Q_n}{A_n} \quad (5)$$

$$TP_n = \frac{L_n}{V_n} \quad (6)$$

$$TP_N = \frac{\sum_{n=1}^{n=N} TP_n}{86400} \quad (7)$$

$$D_N = \sum_{n=1}^{n=N} L_n \quad (8)$$

Onde:

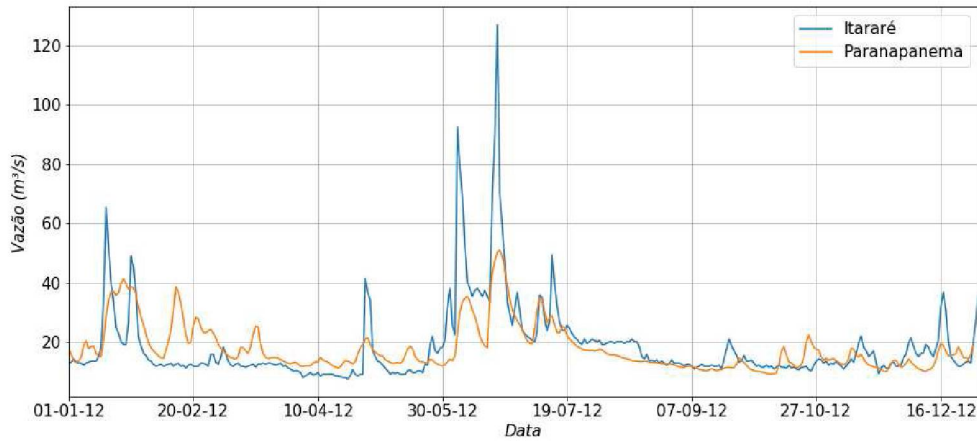
- TP Tempo a percorrer - [dias];
- V Velocidade no trecho da seção transversal - [m/s];
- N Seção transversal que se deseja calcular o TR - [-];
- L Distância entre as seções ( $\Delta x$ ) - [m];
- A Área da seção transversal - [m<sup>2</sup>];
- Q Vazão na seção transversal - [m<sup>3</sup>/s];
- D Distância da barragem - [km].

### 3.3.3 Condições de Contorno

As simulações usam hidrogramas como condição de contorno à montante, para o ano de 2012. Para o Rio Paranapanema, utilizou-se uma série de vazões regionalizada para a

estação 64005000, a partir de um método de regressão linear, apresentado em Fernandes et al. (2020a). Para o Rio Itararé utilizou-se uma série de vazões observadas na estação 64231000. Essas séries são apresentadas na Figura 8.

Figura 8: Condições de contorno a montante para cada um dos rios.



FONTE: O autor (2021).

Como não há estações perto da exutória do Rio Paranapanema com dados de vazão, usou-se a altura normal como condição de contorno de jusante. O cálculo da altura normal requer a inclinação do rio no trecho, que foi considerado igual a inclinação média dos últimos 117 km de rio, baseando-se nos dados de elevação e distância da exutória das estações 64535080 e 64571100, as duas últimas usadas nas simulações, calculado pela equação 9.

$$IC = \frac{Elev_{64535080} - Elev_{64571100}}{L} = \frac{287 - 255}{117410} = 0,0273\% \quad (9)$$

Onde:

- $IC$  Inclinação do fundo - [ - ];
- $Elev_{64535080}$  Elevação da estação 64325080 - [ m ];
- $Elev_{64571100}$  Elevação da estação 64571100 - [ m ];
- $L$  Comprimento do trecho - [ m ].

Também como condições de contorno, usou-se séries de vazões para as contribuições laterais e descarga das barragens dos três principais reservatórios. O termo  $q$  nas equações de Saint - Venant (equações 1 e 2) é responsável por representar toda transferência de água que acontece entre o rio e o ambiente ao seu redor, principalmente as vertentes da

bacia. Considerando as diferentes formas de estimar as taxas de contribuição lateral em rios e a disponibilidade de dados, optou-se por usar a diferença entre os hidrogramas observados, usando a fórmula apresentada na equação 10, então distribuída linearmente no trecho (Ferreira et al., 2019; Steinstrasser, 2005; Ferreira et al., 2016).

$$q = \frac{Q_{\text{Jusante}} - Q_{\text{Montante}}}{D} \quad (10)$$

Onde:

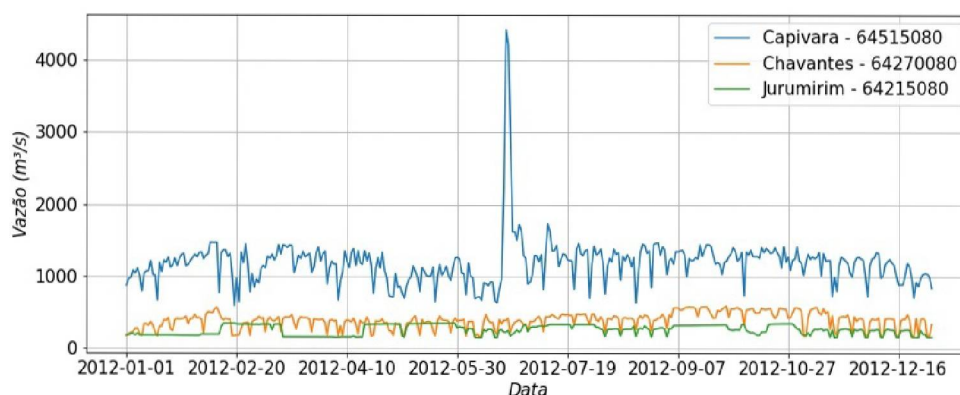
$q$	Contribuição lateral - [ m <sup>3</sup> /s ];
$Q_{\text{Montante}}$	Vazão na estação de montante - [ m <sup>3</sup> /s ];
$Q_{\text{Jusante}}$	Vazão na estação de jusante - [ m <sup>3</sup> /s ].
$D$	Distância entre os pontos - [ m ].

Ao usar a diferença entre hidrogramas observados, obtém-se uma série de vazões por unidade de comprimento, referentes às interações entre o rio e ambiente ao seu redor para os trechos definidos. Esse método é uma aproximação do comportamento observado no rio, sendo que a contribuição lateral real não é igual a diferença entre as vazões observada em dois pontos, existindo também a incerteza de que essas vazões tenham sido medidas no mesmo instante. A compreensão mais clara da precisão desse método exigiria uma análise de sensibilidade, preferencialmente relacionada a modelos dedicados para geração de dados de chuva-vazão. Para esse estudo, assumiu-se que esse erro é aceitável, aplicando-se a metodologia entre todas as estações com dados de vazão para 2012 (Figura 5).

A inserção da estrutura das barragens e definição dos hidrogramas de saída permitem complementar a representação do sistema rio-reservatório. Isso foi realizado para os três reservatórios principais, definindo-se como condição de contorno as séries de vazão defluente disponibilizadas no HIDROWEB, conforme indicado na Figura 5 (ANA, 2019a). Os demais reservatórios são a fio d'água e são representados como trechos de escoamento fluvial. Os hidrogramas de descarga das barragens são apresentados na Figura 9.



Figura 9: Hidrogramas das estações usadas como condições de contorno das barragens (vazões defluentes).



FONTE: O Autor (2021).

### 3.4 Qualidade da Água em Rios

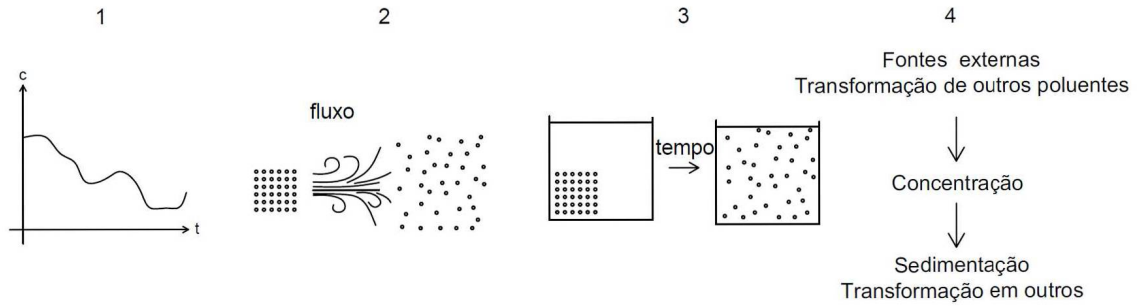
A forma de interpretar a qualidade da água e avaliar alterações é monitorando uma série de parâmetros, como oxigênio dissolvido (OD), frações e concentrações totais de nitrogênio e fósforo, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), algas, químicos, etc. (Chapra, 1997). Entretanto, o processo de monitoramento requer bastante tempo e recursos para ser conduzido, levando a séries de dados observados para alguns parâmetros considerados mais representativos, com intervalos variados entre as coletas. Tomando como exemplo a estação HIDROWEB 64326000, cujo código CETESB é 02500, localizada após o reservatório de Chavantes e no centro da bacia, tem-se dados de temperatura, pH, turbidez, condutividade, demanda química de oxigênio (DQO), DBO, OD, sólidos totais, cloretos, índice de qualidade das águas (IQA), frações de nitrogênio e nitrogênio total (NT), frações de fósforo e fósforo total (PT), medidos em intervalos bimestrais entre 1996 e 2010 (ANA, 2019a). Destaca-se a importância do monitoramento contínuo, disponibilizando séries maiores de dados para estudos futuros, sendo que nesse estudo foram realizadas simulações de OD, DBO, NT e PT. As séries de dados de qualidade da água disponíveis na área de estudo tem, majoritariamente, resolução bimestral ou trimestral, o que levou a geração de séries sintéticas para as condições de contorno (Fernandes et al., 2020a).

### 3.4.1 Equação Advecção-Dispersão-Reação

A representação da qualidade da água em rios é feita usando a Equação de Advecção-Dispersão-Reação (ADR - equação 11), que descreve a variação na concentração de poluentes ao longo do tempo e espaço para determinado poluente. Os termos indicados pelos números na Figura 10 e Equação 11 indicam:

1. Variação da concentração do poluente em função do tempo, resultado da interação dos fenômenos descritos nos itens 2, 3 e 4;
2. Advecção - mistura causada pelo movimento da água;
3. Dispersão - mistura causada pela diferença de concentrações e por gradientes de velocidade;
4. Fontes e sumidouros - taxa de variação de concentração dos poluentes, causada por sedimentação e fenômenos de transformação. Explicada em detalhes na seção 3.4.2.

Figura 10: Fenômenos representados na equação ADR. FONTE: O autor.



FONTE: O autor (2021).

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} V \phi}_1 = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (Q \phi) \Delta x}_2 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \Delta x}_3 \pm \underbrace{S}_4 \quad (11)$$

Onde:

- V Volume da célula computacional -  $[m^3]$ ;
- $\phi$  Concentração -  $[kg/m^3]$ ;
- Q Vazão -  $[m^3/s]$  ;
- $\Gamma$  Coeficiente de dispersão -  $[m^2/s]$ ;
- A Área da seção transversal -  $[m^2]$ ;
- S Fontes e sumidouros -  $[kg/s]$ .

### 3.4.2 HEC-RAS

As simulações de qualidade da água no HEC-RAS são baseadas na solução da equação ADR (equação 11), usando o esquema de soluções numéricas explícito *Quickest - Ultimate* (Brunner and CEIWR-HEC, 2016). O termo  $S$ , que representa a taxa de variação na concentração do parâmetro para cada instante de tempo da solução da equação 11, é calculado individualmente para cada fração simulada e ajustado através de taxas constantes, definidas ao longo da etapa de calibração, ilustradas na Figura 11.



and CEIWR-HEC, 2016).

### Nitrogênio Orgânico Dissolvido - OrgN

$$OrgN_{fontes/sumidouros} = \alpha_1 \rho AL - \beta_3 OrgN - \sigma_4 OrgN \quad (12)$$

Onde:

- OrgN Taxa de conversão do nitrogênio orgânico - [kg s<sup>-1</sup>];
- $\alpha_1$  Fração da biomassa de algas que é nitrogênio - [mgN mgA<sup>-1</sup>];
- $\rho$  Taxa de respiração das algas - [d<sup>-1</sup>];
- $\beta_3$  Conversão de OrgN para amônia - [-];
- $\sigma_4$  Sedimentação de OrgN - [-];
- AL Concentração de algas - [kg m<sup>-3</sup>];

Sendo que os termos da direita representam, respectivamente: respiração das algas, hidrólise (OrgN  $\Rightarrow$  NH<sub>4</sub>) e sedimentação.

### Nitrogênio Amoniacal - NH<sub>4</sub>

$$NH4_{fontes/sumidouros} = \beta_3 OrgN + \frac{\sigma_3}{d} - \beta_1 (1 - \exp^{-KNR \cdot DOX}) NH4 - F_1 \alpha_1 \mu AL \quad (13)$$

Onde:

- $\beta_3$  Conversão de OrgN para amônia - [d<sup>-1</sup>];
- $\beta_1$  Conversão de amônia para nitrito - [d<sup>-1</sup>];
- $\sigma_3$  Fonte bentônica de amônia - [mgNm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>];
- d Profundidade média do canal - [m];
- $\mu$  Taxa de crescimento local de algas - [d<sup>-1</sup>];
- $\alpha_1$  Fração da biomassa de algas que é nitrogênio - [mgN mgA<sup>-1</sup>];
- KNR Coeficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem - [mgO<sup>-1</sup>L];
- DOX Concentração de oxigênio dissolvido - [mgO L<sup>-1</sup>];
- F<sub>1</sub> Fração de absorção pelas Algas - [-].

Sendo que os termos da direita representam, respectivamente: hidrólise ( $\text{OrgN} \Rightarrow \text{NH}_4$ ), difusão dos organismos bentônicos, oxidação ( $\text{NH}_4 \Rightarrow \text{NO}_2$ ) e consumo das algas.

### Nitrito - $\text{NO}_2$

$$\text{NO}_2_{\text{fontes/sumidouros}} = \beta_1 * (1 - \exp_{\text{-KNR.DOX}}) \text{NH}_4 - \beta_2 * (1 - \exp_{\text{-KNR.DOX}}) \quad (14)$$

Onde:

$\beta_1$  Oxidação de amônia para nitrito -  $[\text{d}^{-1}]$ ;

$\beta_2$  Oxidação de nitrito para nitrato -  $[\text{d}^{-1}]$ ;

KNR Coeficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem -  $[\text{mgO}^{-1}\text{L}]$ .

Sendo que os termos da direita representam, respectivamente, a oxidação dos poluentes ( $\text{NH}_4 \Rightarrow \text{NO}_2$  e  $\text{NO}_2 \Rightarrow \text{NO}_3$ ).

### Nitrato - $\text{NO}_3$

$$\text{NO}_3_{\text{fontes/sumidouros}} = \beta_2 * (1 - \exp_{\text{-KNR.DOX}}) \text{NO}_2 - (1 - F_1) \alpha_1 \mu A \quad (15)$$

Onde:

$\beta_1$  Oxidação de amônia para nitrito -  $[\text{d}^{-1}]$ ;

$\beta_2$  Oxidação de nitrito para nitrato -  $[\text{d}^{-1}]$ ;

KNR Coeficiente de inibição de nitrificação de primeira ordem -  $[\text{mgO}^{-1}\text{L}]$ .

Sendo que os termos da direita representam, respectivamente: oxidação ( $\text{NO}_2 \Rightarrow \text{NO}_3$ ) e consumo das algas.

### Nitrogênio Total - NT

O HEC - RAS não exporta diretamente as concentrações de NT, que foram calculadas posteriormente somando as concentrações de OrgN,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}_3$ .

### 3.4.2.2 Fósforo

Os parâmetros de fósforos simulados são: fósforo dissolvido orgânico (OrgP) e ortofosfato dissolvido inorgânico ( $PO_4$ ). Esses materiais entram no rio principalmente como matéria particulada - não considerada na versão utilizada do HEC-RAS, que considera apenas a forma dissolvida. Os processos envolvidos no aporte e transformação do fósforo ao longo do rio são explicados pelo ciclo do fósforo (Chapra, 1997). As frações de ortofosfato inorgânico podem ser considerada representativas da concentração total de fósforo (Fernandes et al., 2020b; Kozak, 2016; Knapik, 2014).

$$PO4_{\text{fontes/sumidouros}} = \beta_4 OrgP + \frac{\sigma_2}{d} - \alpha_2 \mu A \quad (16)$$

Onde:

- $\sigma_2$  Fonte bentônica de ortofosfato -  $[mgP \ m^{-2} \ d^{-1}]$ ;
- $\alpha_2$  Fração da biomassa de algas que é fósforo -  $[mgP \ mgA^{-1}]$ ;
- $\mu$  Taxa de crescimento local de algas -  $[d^{-1}]$ ;
- $d$  Profundidade média do canal -  $[m]$ .

Sendo que os termos da direita representam, respectivamente: decaimento( $OrgP \Rightarrow PO_4$ ), difusão dos organismos bentônicos e consumo das algas.

### 3.4.2.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

O comportamento de DBO é descrito por um decaimento de primeira ordem (equação 17).

$$DBO_{\text{fontes/sumidouros}} = K_1 CBOD - K_3 CBOD \quad (17)$$

Onde:

CBOD Concentração de DBO - [mgDOB L<sup>-1</sup>];

K<sub>1</sub> Taxa de desoxigenação - [d<sup>-1</sup>];

K<sub>3</sub> Taxa de perda de DBO por sedimentação - [d<sup>-1</sup>].

Sendo que os termos da direita representam, respectivamente a oxidação (decaimento) da DBO e sua sedimentação.

#### 3.4.2.4 Oxigênio Dissolvido (OD)

As fontes de oxigênio em rios são a reaeração atmosférica e fotossínteses das algas, tendo seu valor limitado pela concentração de saturação. As perdas vêm pelo consumo das algas, DBO e oxidação da amônia e nitrito. Esses fenômenos são representados pela equação 18.

$$OD_{\text{fontes/sumidouros}} = K_2(O_{\text{sat}} - OD) + AL(\alpha_3\mu - \alpha_4\rho) - K_1CBOD - \frac{K_4}{d} - \alpha_5\beta_1NH_4 - \alpha_6\beta_2NO_2 \quad (18)$$

Onde:

O<sub>sat</sub> Concentração de saturação do oxigênio dissolvido - [mgOLd<sup>-1</sup>];

α<sub>3</sub> Produção de O<sub>2</sub> por unidade de alga - [mgO mgALd<sup>-1</sup>];

α<sub>4</sub> Consumo de O<sub>2</sub> por unidade de alga - [mgO mgALd<sup>-1</sup>];

α<sub>5</sub> Consumo de O<sub>2</sub> por unidade de NH<sub>4</sub> oxidada - [mgO mgNd<sup>-1</sup>];

α<sub>6</sub> Consumo de O<sub>2</sub> por unidade de NO<sub>2</sub> oxidada - [mgO mgNd<sup>-1</sup>];

K<sub>1</sub> Taxa de desoxigenação de DBO - [d<sup>-1</sup>];

K<sub>2</sub> Taxa de reaeração diária - [d<sup>-1</sup>];

K<sub>4</sub> Taxa de consumo de oxigênio pelo sedimento - [mg m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>];

β<sub>1</sub> Taxa de oxidação da amônia - [d<sup>-1</sup>];

β<sub>2</sub> Taxa de oxidação do nitrito - [d<sup>-1</sup>];

d Profundidade média do canal - [m].

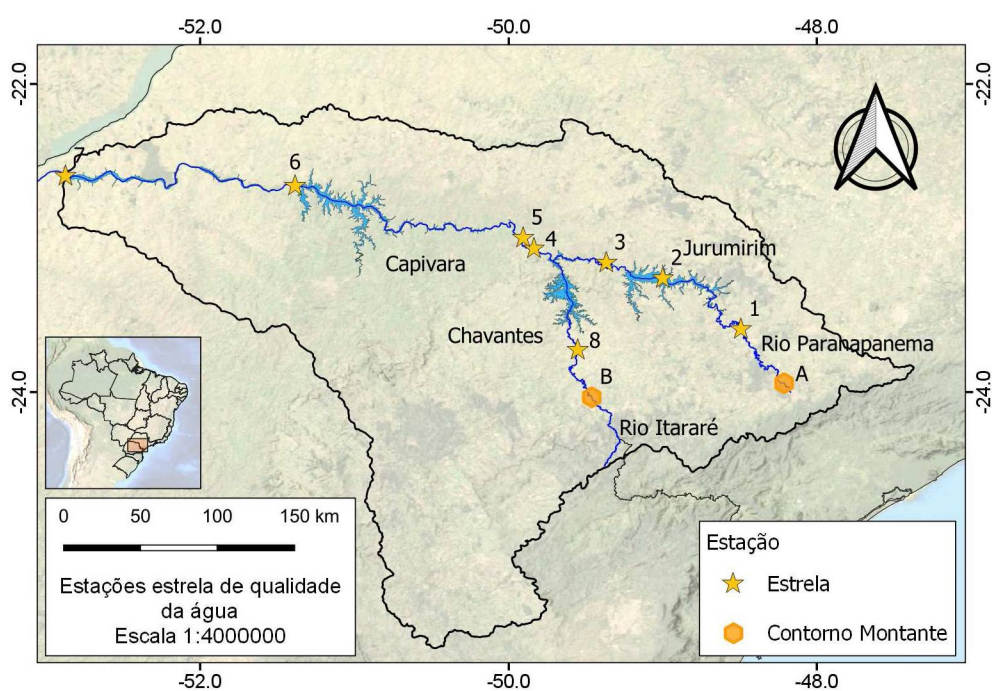
Sendo que os termos da direita representam, respectivamente: reaeração, fotossíntese e respiração, demanda de oxigênio de DBO, demanda de oxigênio do sedimento, oxidação da amônia e oxidação do nitrito.



### 3.4.3 Dados de Entrada

Os dados de entrada de qualidade da água abrangem as condições iniciais, de contorno e meteorológicas. A base para geração desses dados são algumas estações de controle, chamadas de estação estrela. Essas são selecionadas de acordo com a disponibilidade de dados e posição, favorecendo-se aquelas logo antes e depois dos reservatórios, com suas posições ilustradas na Figura 12, junto com as estações usadas como condição de contorno de montante (Fernandes et al., 2020b).

Figura 12: Mapa das estações estrela de qualidade da água, onde os números correspondem aos código HIDROWEB e CETESB: 1 = 64081000 / PARP 02100; 2 = 64214000 / JURU 02500; 3 = 64219000; 4 = 64278080; 5 = 64326000 / PARP02500; 6 = 64516900 / PARP 02750; 7 = 64571100 / PARP02900; 8 = 64245200 / ITAR 02500. A = 64081000 e B = 64231000.



FONTE: O autor (2021).

Os dados de qualidade da água usados como condição de contorno de montante são séries sintéticas, criadas usando método baseado no processo regressivo de primeira ordem e dados de 2005 a 2017, usando dados obtidos de Fernandes et al. (2020a). As condições de contorno laterais são os aportes de poluentes gerados pela bacia, obtidas misturando as cargas geradas por Fernandes et al. (2020c), tanto pontuais quanto difusas, na vazão com

tempo de permanência de 50% ( $Q_{50}$ ) da contribuição lateral do trecho. Essas cargas foram geradas para toda a bacia do Paranapanema, usando o método simplificado e ottobacias de nível 6, e então agrupadas em 125 sub-bacias ligadas aos rios Itararé e Paranapanema, todas dentro de uma única UGH. As cargas pontuais e difusas dessas sub-bacias foram agrupadas de forma a gerar representar os trechos apresentados na Figura 5, e portando o aporte de carga nesses trechos. Após definida a  $Q_{50}$  do trecho, cuja série foi gerada para as simulações hidrodinâmicas, é possível diluir a carga do trecho na vazão lateral de entrada, obtendo uma concentração de entrada, cujos valores são exibidos nas tabelas 2 e 3, para os rios Paranapanema e Itararé, respectivamente.

Tabela 2: Concentrações dos aportes laterais por trecho para o Rio Paranapanema, de acordo com a Figura 5, onde C = Concentração e EXT = Exutória. FONTE: O autor.

C (mg/l)	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - EXT
DBO	4.304	1.690	2.147	2.718	1.209	2.487	4.053	8.568	2.101	1.325
NT	1.534	0.655	0.852	1.110	0.492	1.070	1.314	3.213	0.800	0.442
PT	0.224	0.099	0.085	0.156	0.041	0.093	0.370	0.464	0.142	0.049

Tabela 3: Concentrações dos aportes laterais por trecho para o Rio Itararé, de acordo com a Figura 5, onde C = Concentração. FONTE: O autor.

C (mg/l)	13 - 14	14 - 5
DBO	3.076	0.489
NT	1.139	1.989
PT	0.180	0.228

A calibração foi conduzida por tentativa e erro, ajustando os parâmetros de reação e visando aproximar a mediana das séries obtidas pelo modelo com aquelas das séries de concentrações observadas, para as estações estrela (Figura 12) para os parâmetros DBO, NT, PT e OD. Após a calibração, foram conduzidas as simulações para os cenários futuros, para os anos de 2025 e 2035 e com cenários estagnados (E25 e E35), tendenciais (T25 e T35) e acelerados (A25 e A35), representando o aumento de aporte de cargas nos rios de acordo com o desenvolvimento da região. Os valores referentes a esses aumentos de carga são um aumento linear na emissão de poluentes, associado a cada UGH da bacia.

O aporte de cargas no rio é relacionado a sub-bacias, pertencentes a UGHs, portanto aplicando-se os valores apresentados na tabela 4, é possível gerar os cenários de aporte de cargas dos cenários futuros (Fernandes et al., 2020b).

Tabela 4: Coeficientes de cenarização para aumento do aporte de cargas nos cenários futuros. FONTE: Fernandes et al. (2020b).

UGRH/UPH	Tendencial		Acelerado		Estagnado	
	2025	2035	2025	2035	2025	2035
Alto Paranapanema	1.531	1.986	1.770	2.746	1.373	1.622
Médio Paranapanema	1.625	2.267	1.967	3.633	1.425	1.742
Pontal do Paranapanema	1.565	2.174	1.902	3.533	1.370	1.630
Norte Pioneiro	1.552	2.178	1.925	3.833	1.351	1.609
Tibagi	1.345	1.828	1.632	3.172	1.207	1.402
Piraponema	1.472	1.944	1.736	3.088	1.328	1.544

## 4 Resultados e Discussão

*Não têm nada como procurar, quando você quer encontrar algo. Você certamente vai encontrar algo, se procurar, mas nem sempre vai encontrar exatamente o que estava você estava atrás.*

J.R.R. Tolkien, O Hobbit

Nas próximas seções são apresentados os resultados obtidos pela modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água. Esses dados são segmentados em avaliação dos hidrogramas simulados, perfil de velocidade e elevação da superfície da água, curvas de permanência dos parâmetros de qualidade da água, dos cenários futuros e comportamento da seção de transição rio - reservatório.

### 4.1 Modelo Hidrodinâmico

Os resultados do modelo hidrodinâmico são apresentados para as estações com dados disponíveis para comparação (Figura 5) ao longo do perfil dos rios Paranapanema e Itararé.

#### 4.1.1 Hidrogramas e Curvas de Permanência

Os resultados a seguir são apresentados na forma de hidrograma e curvas de permanência para as estações com dados disponíveis e que não foram usadas como condição de contorno, comparando as vazões diárias observadas com os resultados das simulações utilizando o modelo HEC-RAS. Os resultados são apresentados no sentido do escoamento entre as Figuras 13 e 26, de acordo com as estações apresentadas na Figura 5.

Para avaliar as séries geradas, usou-se o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe, descrito pela equação 19. O resultado é um coeficiente que varia de menos infinito até 1, sendo que resultados mais próximos de 1 são melhores, um coeficiente igual a zero indica a mesma capacidade preditiva da média da série em termos do erro elevado ao quadrado. Resultados negativos indicam, em termos práticos, que a média da série seria um modelo mais eficaz.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (19)$$

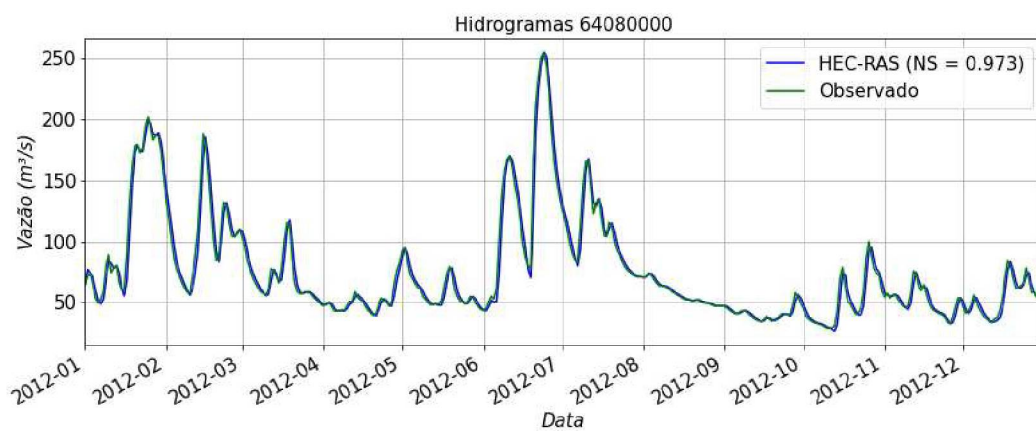
Onde:

$\bar{Q}_o$  Média das vazões observadas - [ m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>];

$Q_m$  Vazão simulada - [ m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>];

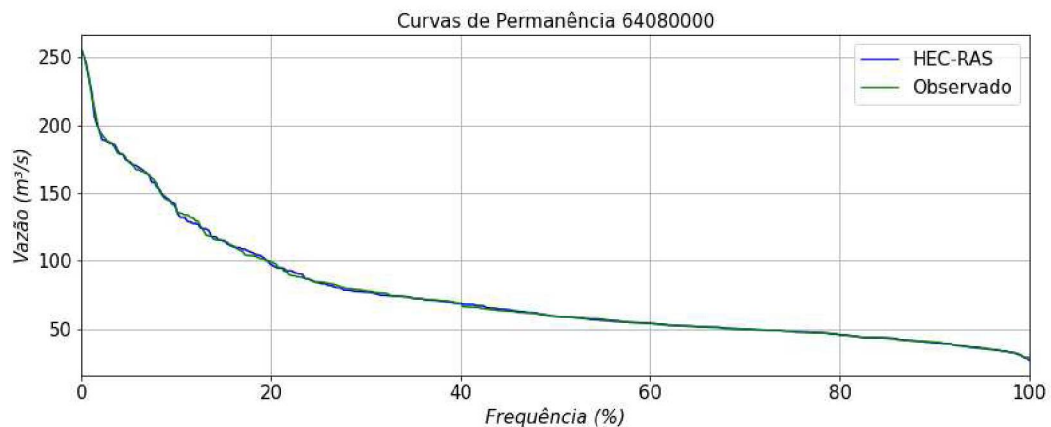
$Q_o^t$  Vazão observada no instante  $t$  - [ m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>];

Figura 13: Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64080000.



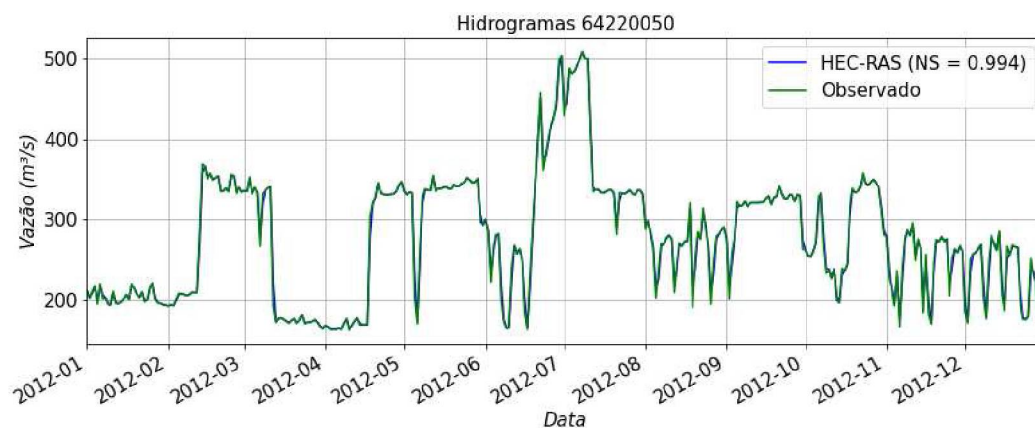
FONTE: O autor (2021).

Figura 14: Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64080000.



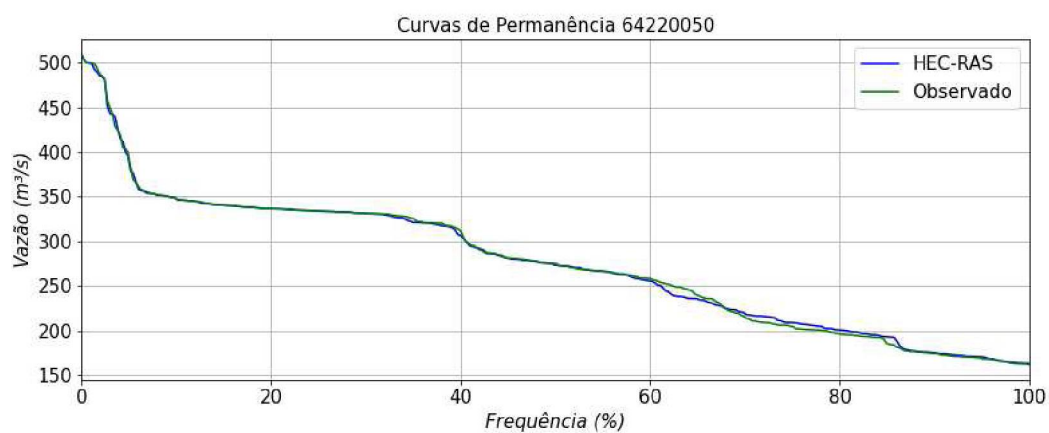
FONTE: O autor (2021).

Figura 15: Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64220050.



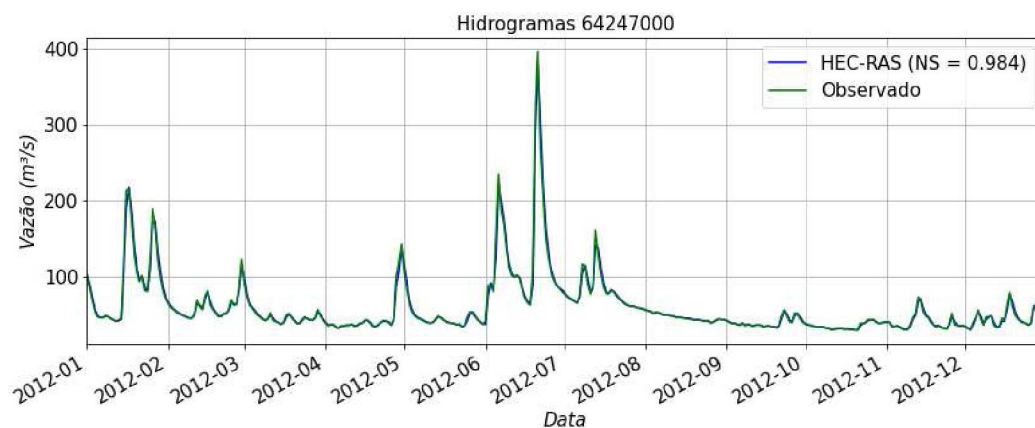
FONTE: O autor (2021).

Figura 16: Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64220050.



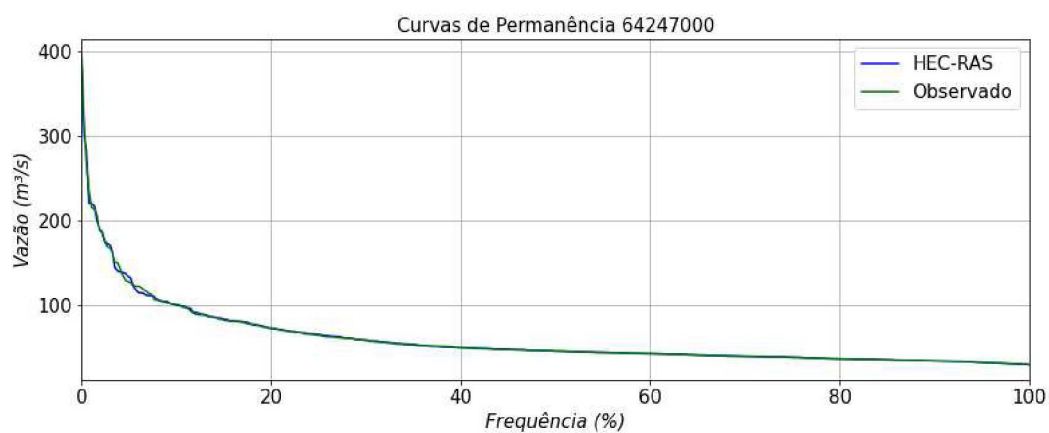
FONTE: O autor (2021).

Figura 17: Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64247000.



FONTE: O autor (2021).

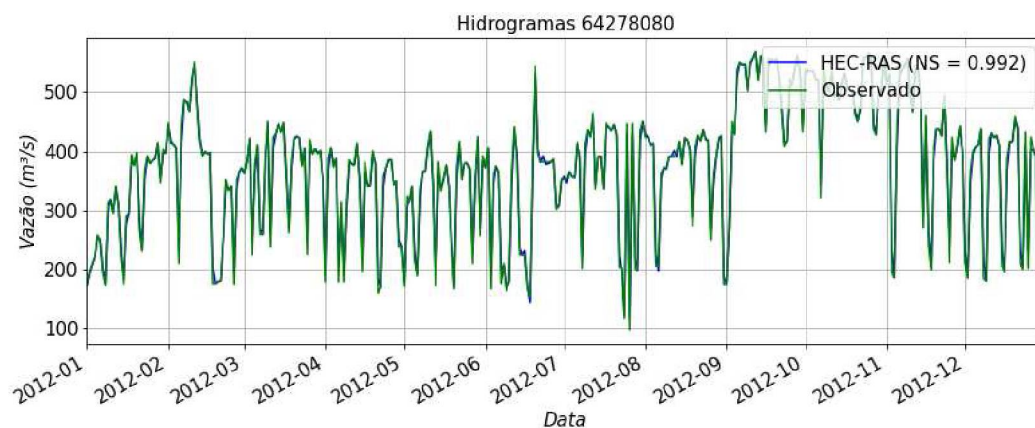
Figura 18: Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64247000.



FONTE: O autor (2021).

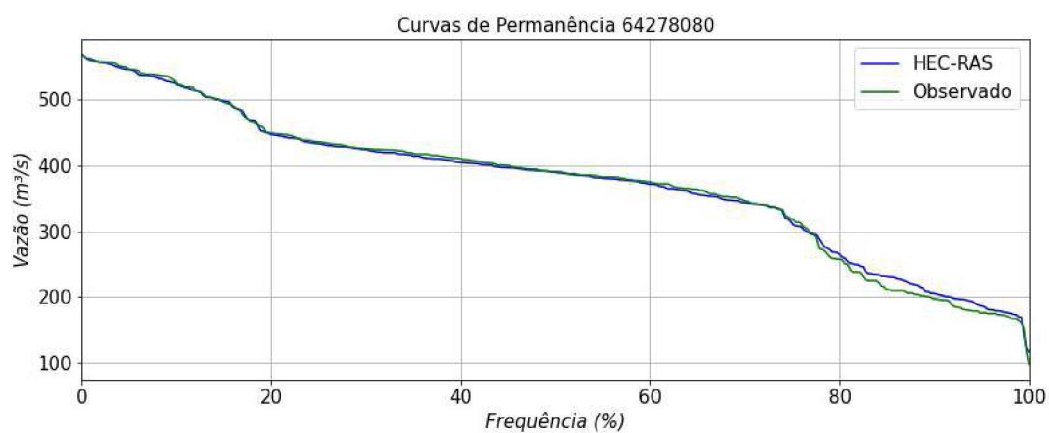


Figura 19: Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64278080.



FONTE: O autor (2021).

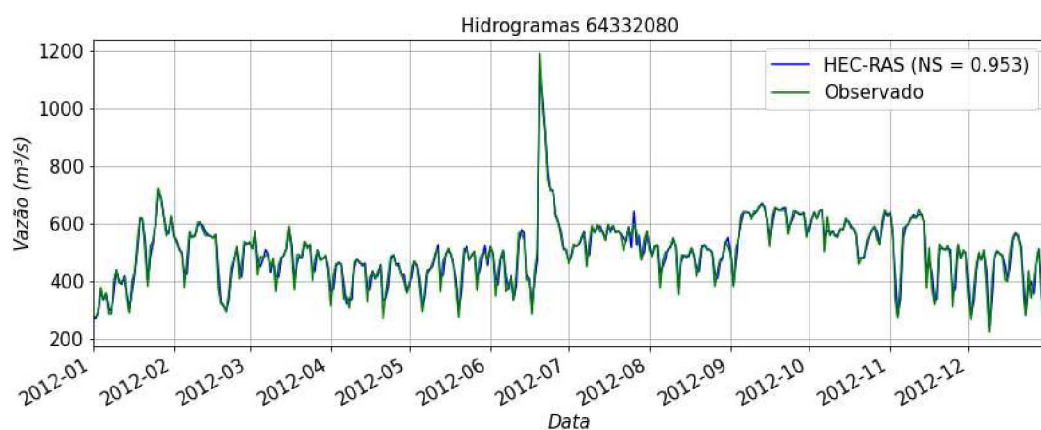
Figura 20: Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64278080.



FONTE: O autor (2021).

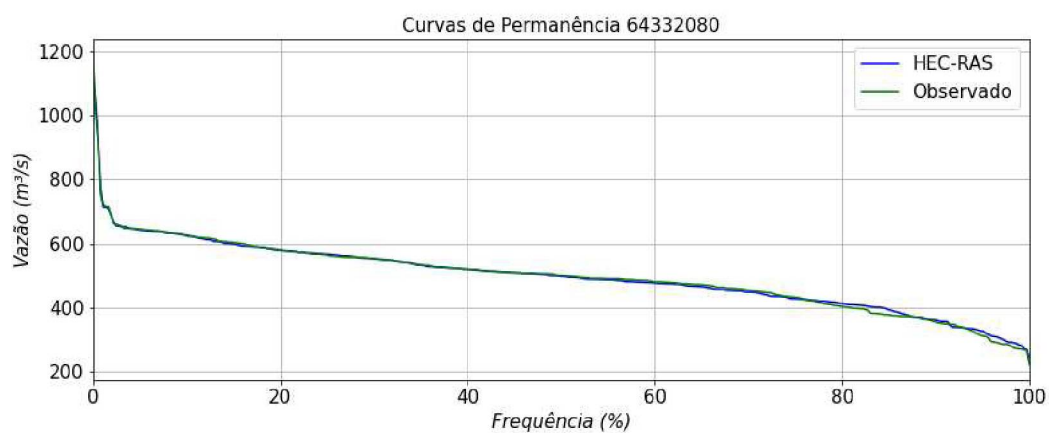


Figura 21: Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64332080.



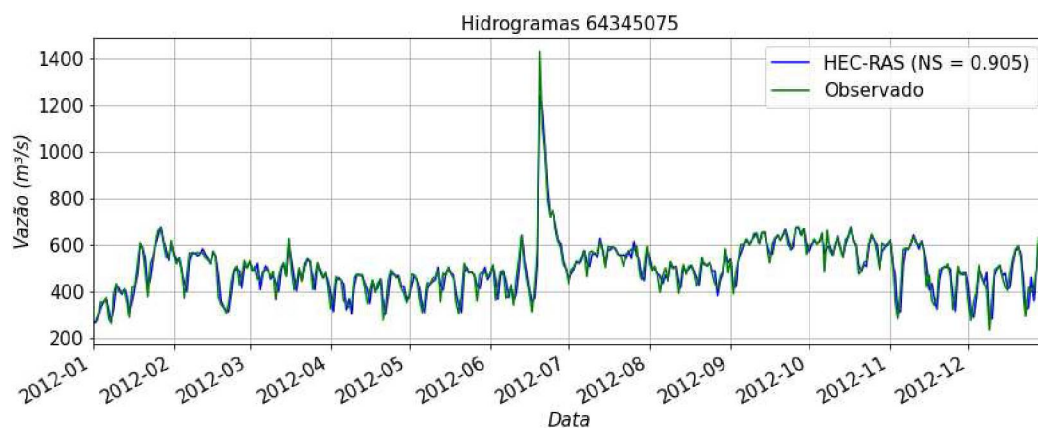
FONTE: O autor (2021).

Figura 22: Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64332080.



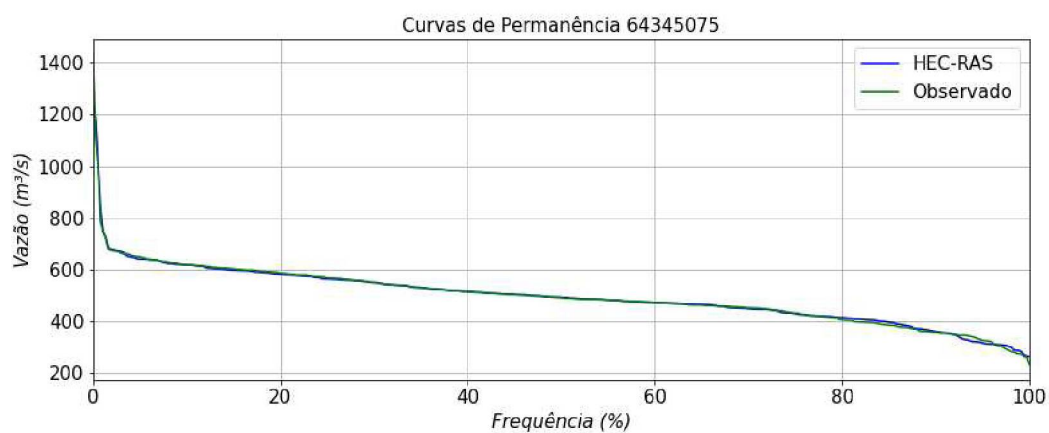
FONTE: O autor (2021).

Figura 23: Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64345075.



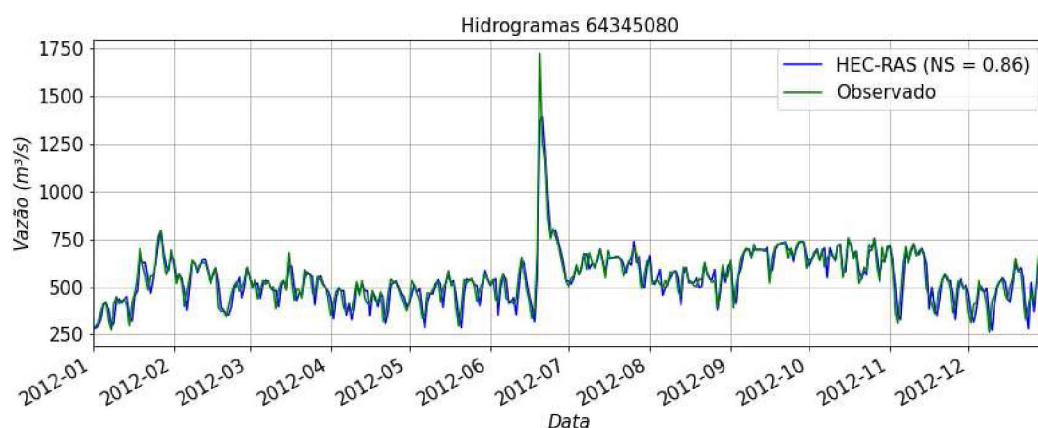
FONTE: O autor (2021).

Figura 24: Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64345075.



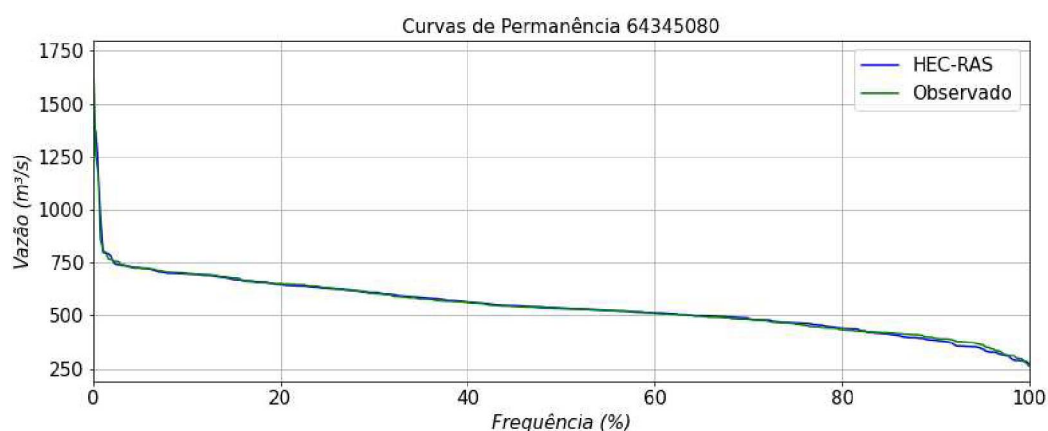
FONTE: O autor (2021).

Figura 25: Comparação entre os hidrogramas das séries de vazões simuladas e observadas para a estação 64345080.



FONTE: O autor (2021).

Figura 26: Comparação entre as curvas de permanência das vazões diárias simuladas e observadas - Estação 64345080



FONTE: O autor (2021).

Os resultados das simulações hidrodinâmicas foram considerados satisfatórios, com vazões diárias simuladas próximas daquela observadas, conclusão baseada nos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), que variam entre 0,860 e 0,994 para a simulação integrada para os Rios Paranapanema e Itararé no ano de 2012. Esses resultados comprovam a flexibilidade do HEC-RAS e do método utilizado, que tem como desafios a geometria com mais de 1000 quilômetros de rio e 8 reservatórios, sendo 3 de grande porte e com suas regras de operação sendo representadas pelas vazões de descarga. Três dos reservatórios tem as vazões de saída controladas por comportas e 5 são a fio d'água. Além disso, obteve-se

resultados satisfatórios na zona de confluência dos rios Paranapanema e Itararé, onde a representação do escoamento é essencial na simulação hidrodinâmica (Schindfessel et al., 2015).

Adicionalmente, tem-se a geração de seções transversais a partir do MDE, nesse caso com resolução horizontal de 30 metros e vertical de 1 metro, uma hipótese que se mostrou válida, complementando os resultados de Fleischmann et al. (2019). Esse avaliou a eficácia de modelos hidrológicos de grande porte em simular hidrogramas, avaliando como a resolução do MDE impacta os resultados. A base para comparação foi um modelo no HEC-RAS, concluindo que a geração de seções transversais por MDE é viável e capaz de gerar bons resultados. Também gerando geometria a partir do MDE, Gichamo et al. (2012) conduziu um estudo voltado a modelagem hidrodinâmica aplicada a inundações, citando que os resultados são encorajadores e com bom potencial. Entretanto, ressalta alguns desafios no seu uso, destacando a resolução e precisão dos dados que usou (*Global Digital Elevation Model - ASTER GDEM*) e MDEs em geral, que requerem pré-processamento antes de serem usados.

Entre os resultados apresentados, nota-se que trechos de cabeceira têm hidrogramas e curvas de permanência diferentes dos demais. As estações 61081000 no Rio Paranapanema (figuras 13 e 14) e 64247000 no Itararé (figuras 17 e 18) não tem suas vazões controladas por reservatórios, o que se reflete em hidrogramas com mudanças menos bruscas e picos mais espaçados que nas demais. As curvas de permanência também têm formato diferente, mais arredondado e com poucas variações. As demais estações, por sua vez, têm hidrogramas com picos que variam com maior frequência e de forma uniforme, indicando o efeito da operação dos reservatórios. Nota-se que o período de junho/julho tem as maiores vazões diárias do ano, mas que os demais períodos tem oscilações constantes e dentro de faixas (figuras 25, 23 e 21), novamente indicando a operação dos reservatórios, nesse caso a frequências e variação nas descargas. Esse comportamento se reflete nas curvas de permanência das estações a jusante dos reservatórios, que ao contrário daquelas de cabeceira, tem formato menos curvo e inclinações mais constantes (platôs). Esses platôs podem ser interpretados como as vazões mais frequentemente descarregadas dos reservatórios, comportamento observado nas figuras 16 e 20.

O uso da diferença entre os hidrogramas observados como condição de contorno interna, representando as contribuições laterais, gerou bons resultados, complementando os

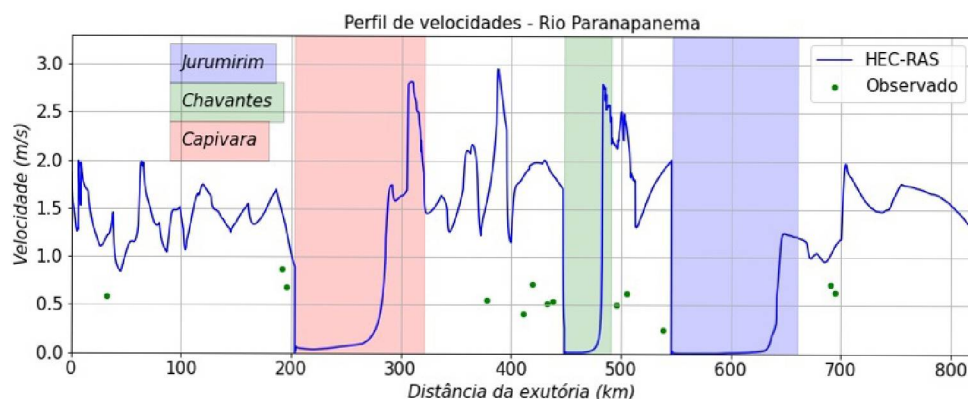
resultados hidrodinâmicos propostos por Ferreira et al. (2020b). Entretanto, esse método não é facilmente alterado para outros cenários de contribuições laterais, visto que é dependente da disponibilidade de dados das estações usadas como base. A simulação para cenários que representem um regime hídrico diferente é possível (Ferreira et al., 2020a), mas a representação correta da relação chuva-vazão, na forma de contribuição lateral afluente nos rios, requer o desenvolvimento de modelos dedicados a isso (Cabral et al., 2016; Che and Mays, 2017; Pinto and de Souza, 2019). De forma geral, os resultados foram considerados satisfatórios e aptos a servir como base para as simulações de qualidade da água.

#### 4.1.2 Perfis

Os perfis de velocidade e profundidade são apresentados para o Rio Paranapanema entre as figuras 27 e 28, e para o Rio Itararé entre as figuras 30 e 31.

##### 4.1.2.1 Paranapanema

Figura 27: Perfil de velocidades para o Rio Paranapanema gerado nas simulações para o dia 09/06/2012 00:00 e mediana das séries de velocidades observadas observados, para os pontos com dados disponíveis.

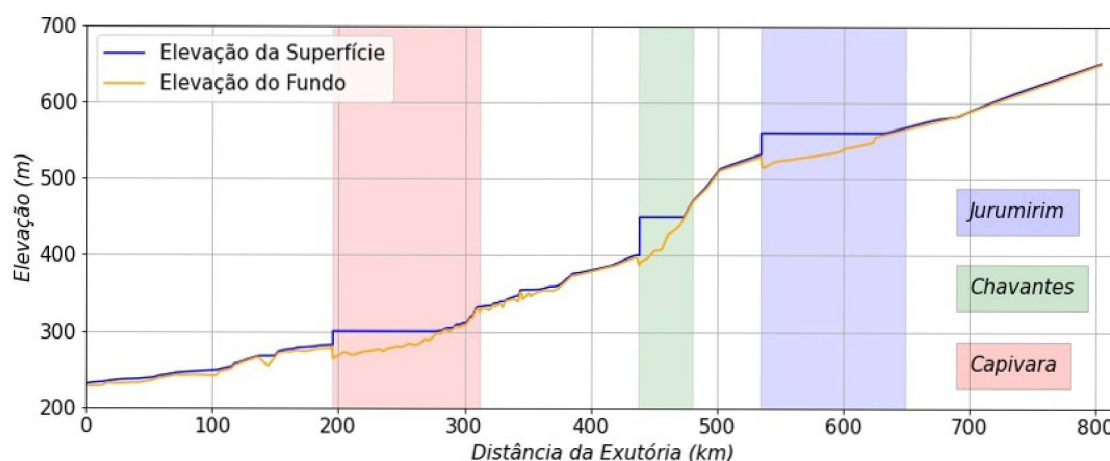


FONTE: O autor (2021).

O perfil de velocidades é referente ao dia 09/06/2012 00:00, e mostra como o método lida com os reservatórios, indicando sua capacidade em simular suas velocidades mais

baixas, mas com velocidades mais altas que as observadas nos trechos de rio. É possível notar variações bruscas nas velocidades, fenômeno atribuído a metodologia aplicada na geração de seções transversais, baseando-se no MDE, que implica em seções transversais cuja área e inclinação de fundo não varia de forma linear. As velocidades elevadas nos trechos de rio, acima de 1m/s, são atribuídas ao nível do rio, que é mais baixo nas simulações que os valores observados (Figura 29), resultado considerado satisfatório visto que a simulação teve como foco as vazões, e não os níveis. Adicionalmente, a metodologia é limitada pela resolução e erros do próprio MDE (Gichamo et al., 2012).

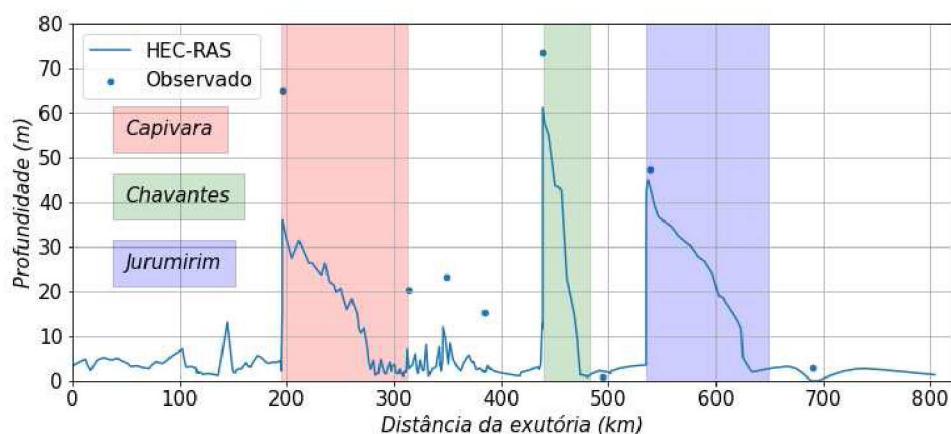
Figura 28: Perfil da superfície da água para o Rio Paranapanema gerado nas simulações.



FONTE: O autor (2021).



Figura 29: Perfil de profundidades gerado pela simulação para o dia 09/06/2012 00:00, comparada a mediana das séries de nível observados observados, para os pontos com dados disponíveis.



FONTE: O autor (2021).

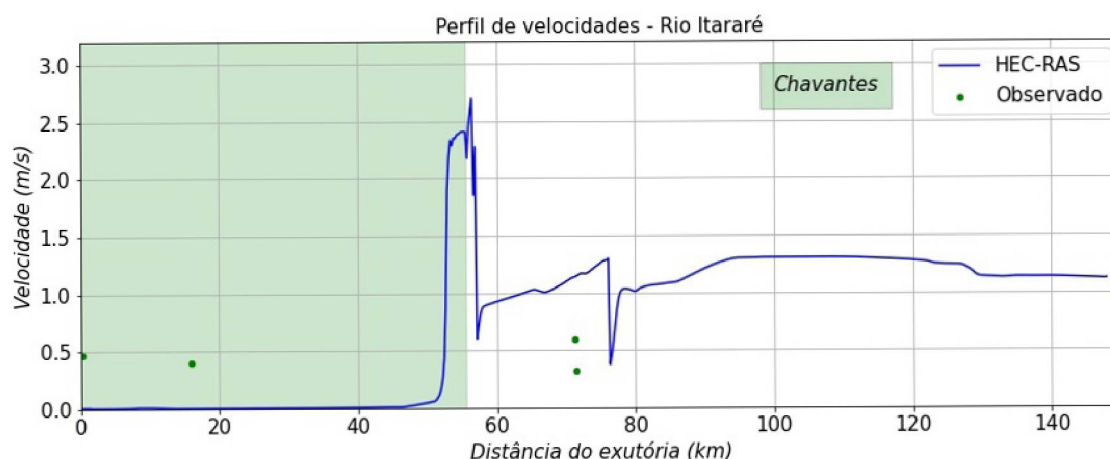
Os perfis de elevação do solo e da superfície simulada da água (Figura 28) permitem entender melhor os detalhes da simulação, em especial em relação às inclinações de fundo e barragens, indicando que o modelo é capaz de representar as profundidades maiores nos reservatórios e a acumulação de água. Embora essa figura indique acumulação da água pouco realista, com elevações acima dos níveis das barragens (distâncias da exutória de 200km, 430km e 520km), a Figura 29 mostra que os reservatórios simulados tem, na verdade, profundidades menores que aquelas observadas, conseguindo reproduzir de forma acurada as profundidades para os reservatórios de Jurumirim e Chavantes. Esse resultado é consequência da forma como as barragens foram inseridas, definidas pela vazão de descarga e sem regras de operação, permitindo que o nível de água no barramento seja superior ao topo da barragem.

Pode-se notar na Figura 28 que a inclinação do fundo é relativamente constante, em especial nos trechos de cabeceira e próximos a exutória, mas oscilando mais em alguns trechos, como na região entre 300 km e 350 km. Adicionalmente, os trechos a menos de 530 km da exutória são afetados pela descarga dos reservatórios, fenômenos que podem explicar as variações de velocidade observadas. Além disso, as figuras 28 e 29 mostram que o perfil vertical dos reservatórios foi bem representado, com profundidades e acúmulo da água ocorrendo através da inclusão de barragens.

#### 4.1.2.2 Perfis Itararé

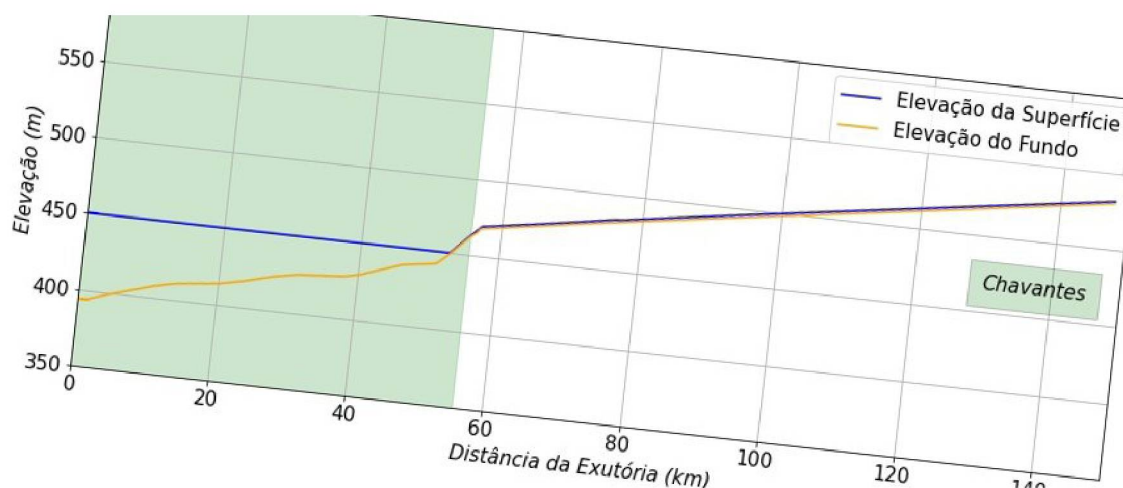
Os perfis de velocidade (Figura 30) e elevação do Rio Itararé (Figura 31) obtidos pela simulação tem o mesmo comportamento daqueles do Rio Paranapanema, representando de forma satisfatória o aumento da profundidade ao longo do reservatório e redução nas velocidades.

Figura 30: Perfil de velocidades para o Rio Itararé gerado nas simulações para o dia 09/06/2012 00:00 e mediana das séries de velocidades observadas observados, para os pontos com dados disponíveis. Os dois pontos próximos representam estações próximas.



FONTE: O autor (2021).

Figura 31: Perfil da superfície de escoamento para o Rio Itararé gerado nas simulações.



FONTE: O autor (2021).



Destaca-se entre os resultados o aumento da velocidade na entrada do reservatório, efeito atribuído a geometria, que passa por uma redução de seção no ponto. Esse tipo de comportamento mostra uma das limitações do método aplicado: a variação das seções transversais geradas a partir do MDE e como uma seção menos larga pode interferir nas velocidades. Esses resultados são esperados, mas deve-se ter certeza de que esse ponto da geometria seja fiel a geometria observada. O uso de seções mais largas, cobrindo toda a largura dos reservatórios, implicaria na criação de pontos não submersos na seção transversal, ou ilhas, que o HEC-RAS pode interpretar como escoamento em canais separados e na planície de alagação, retornando resultados pouco representativos das simulações hidrodinâmicas por conta da interpolação de seções transversais. Essa situação é contornada com a análise das seções transversais sendo representadas, cujos pontos mais próximos a superfície e não submersos devem ser detalhados com maior cuidado para que, quando as seções forem interpoladas, esses pontos sejam representativos daquela observados.

## 4.2 Qualidade da Água

Os resultados de qualidade da água são avaliados na forma de curvas de permanência e boxplots, para os pontos apresentados na Figura 12. As curvas de permanência foram construídas ordenando a concentração do poluente de forma decrescente, indicando a frequência de tempo que determinada concentração é excedida. OD tem as concentrações ordenadas de forma crescente para que valores de permanência menores continuem indicando os valores mais críticos, portanto indicando a frequência de tempo em que determinada concentração de oxigênio dissolvido é atingida.

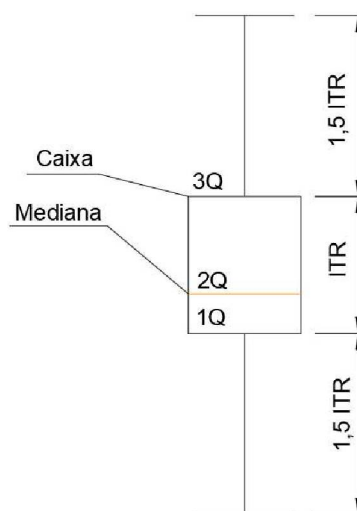
Os resultados comparam as simulações com os dados observados nas estações estrela, importante para a avaliação da frequência de conformidade com os limites de classe do rio. Apresenta-se também os resultados das simulações desenvolvidas para os cenários futuros e os perfis de concentrações ao longo da transição rio-reservatório. Enquanto os cenários futuros tem aplicação na gestão, a avaliação da região de transição visa avaliar como a modelagem hidrodinâmica 1D e de qualidade da água utilizados lidam com os fenômenos de transporte e transformação de poluentes ao longo da transição rio - reservatório.

#### 4.2.1 Estações Estrela - Curvas de Permanência e Boxplots

Os resultados permitem comparar as séries gerados no modelo HEC-RAS com aquelas observadas, usando curvas de permanência e boxplots, além de sua conformidade com as classes definidas na definidas na resolução Conama n<sup>o</sup> 357/2005 (CONAMA, 2005). Para o parâmetro NT (nitrogênio amoniacal), os limites foram arbitrados para fins de comparação, dado que a norma não define valores únicos de referência; para PT, assumiu-se os limites compatíveis a ambientes intermediários entre sistema lântico e lótico, enquanto OD e DBO utilizam-se dos valores especificados para regime fluvial. Essas concentrações são apresentadas na tabela 5.

Os boxplots são criados a partir dos valores dos 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> (mediana) e 3<sup>o</sup> quartis da amostra, com a definição detalhada na Figura 32. Os pontos acima e abaixo representam os outliers, valores fora da distribuição normal. A ausência da caixa indica que Q1, Q2 e Q3 tem o mesmo valor.

Figura 32: Definição dos elementos de um boxplot.



FONTE: O autor (2021).

Tabela 5: Concentrações limite para as classes definidas resolução Conama nº 357/2005.

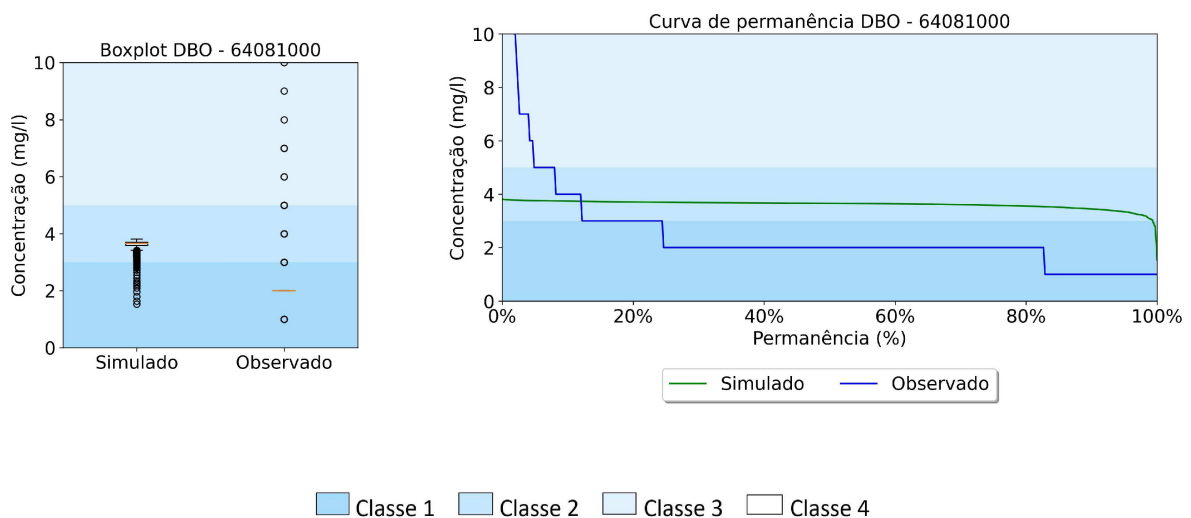
Parâmetro	Classe e Concentrações Limite [mg L <sup>-1</sup> ]			
	1	2	3	4
DBO	3	5	10	20
PT	0.025	0.1	0.15	0.5
NT	3.7	5	13.3	30
OD	6	5	4	1

FONTE: adaptado de CONAMA (2005).

#### 4.2.1.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio

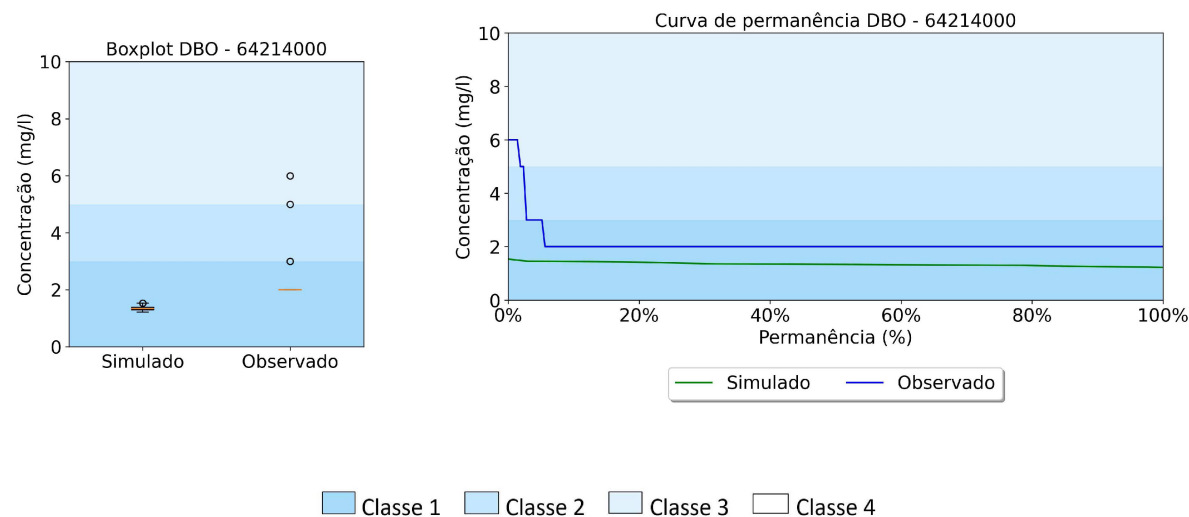
As simulações de DBO apresentadas entre as Figuras ?? e 40, e indicam o desempenho do modelo em simular as séries de concentrações, comparando-as com as séries de concentrações observadas.

Figura 33: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



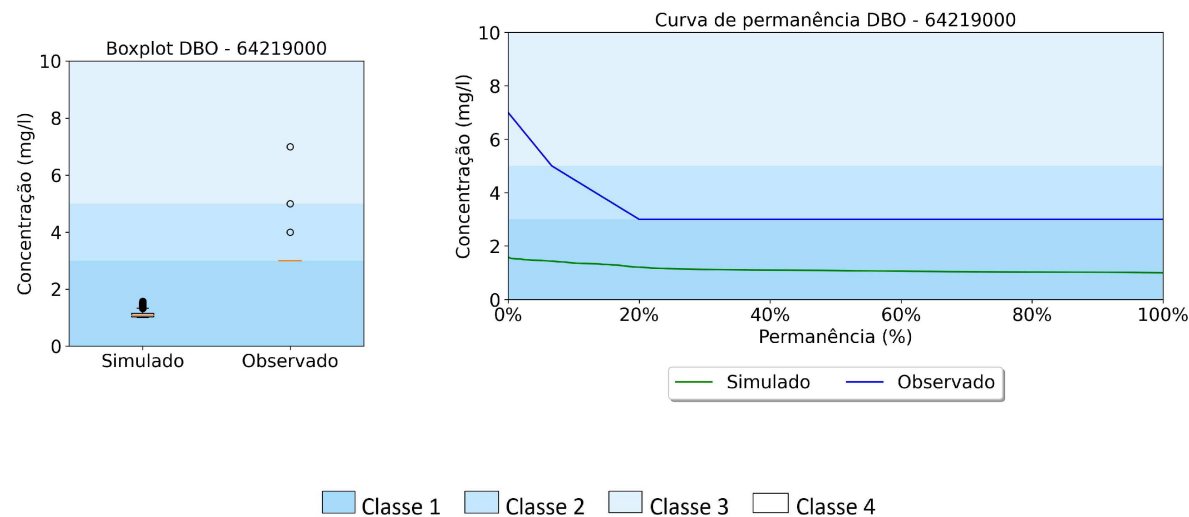
FONTE: O autor (2021).

Figura 34: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



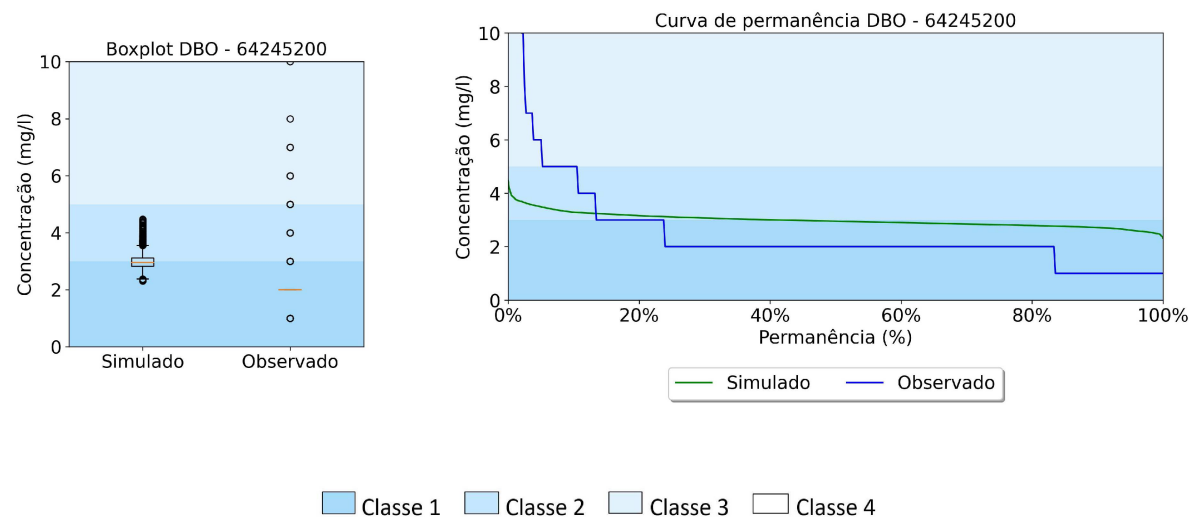
FONTE: O autor (2021).

Figura 35: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 61219000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



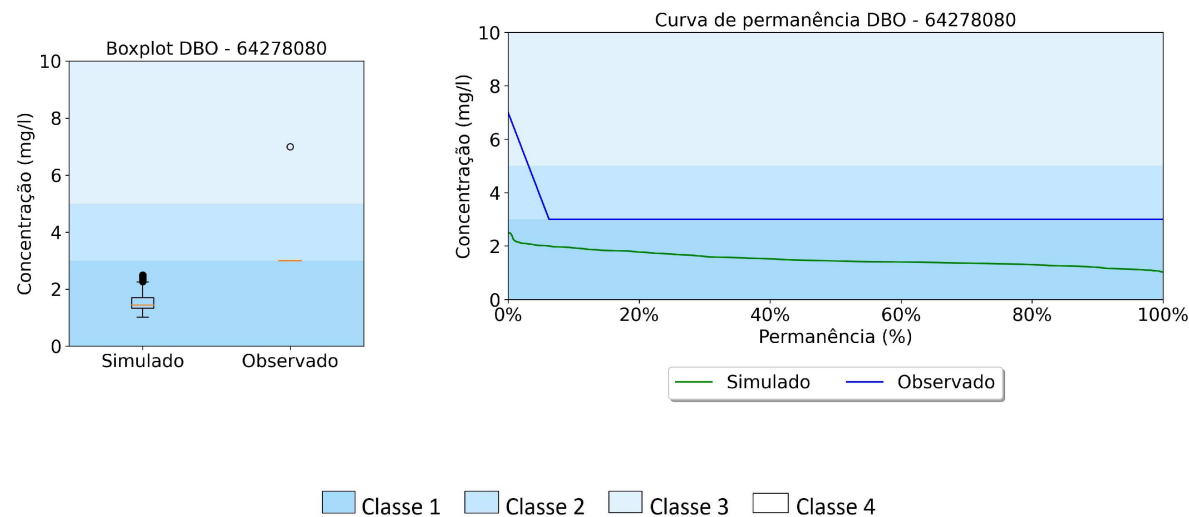
FONTE: O autor (2021).

Figura 36: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



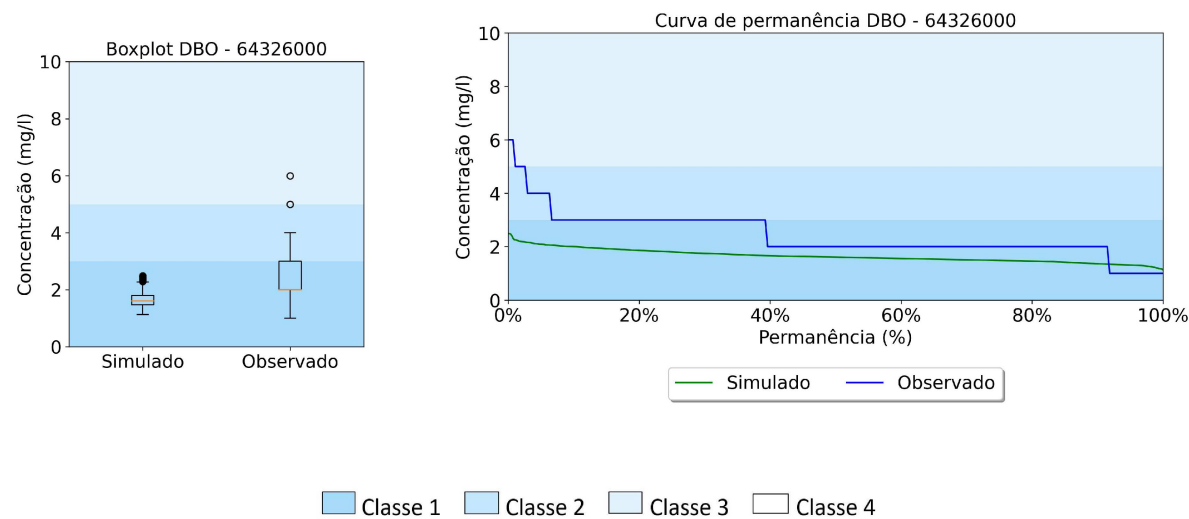
FONTE: O autor (2021).

Figura 37: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64278080 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



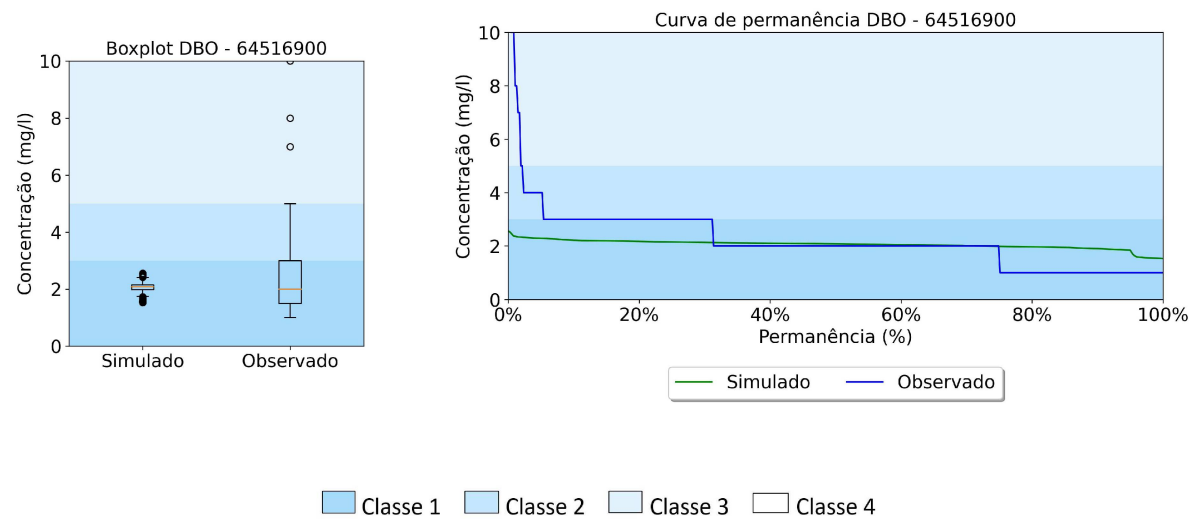
FONTE: O autor (2021).

Figura 38: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



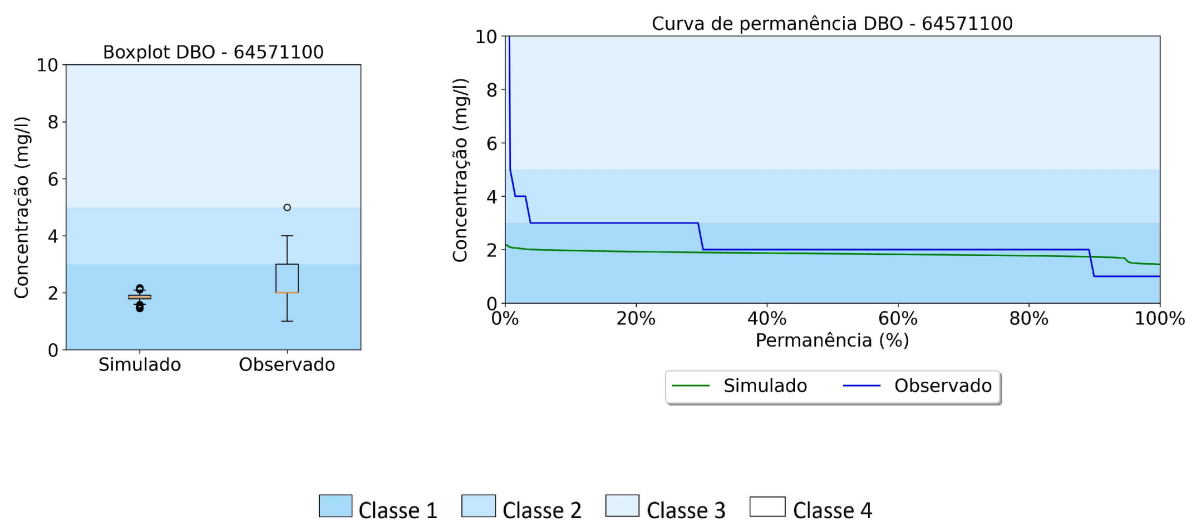
FONTE: O autor (2021).

Figura 39: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

Figura 40: Resultados das simulações de DBO para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

Aquelas nas regiões de cabeceira (64081000, Figura 33 e 64245200, Figura 36) tem comportamento diferente das demais, com a mediana das concentrações simuladas acima daquelas observadas, enquanto as demais estações tendem a subestimar as concentrações simuladas. Esses resultados podem ser consequência do método aplicado para calibração, que foi feita por tentativas, tentando aproximar a mediana das séries simuladas com a das séries observadas. Como o HEC-RAS usa valores constantes para os coeficientes cinéticos (coeficientes de calibração) para toda a geometria, alguns trechos podem não ter seus coeficientes de oxidação e sedimentação de DBO bem representados pela calibração. Essa característica poderia ser contornada de duas formas: através da implementação de cinéticas variadas no espaço no modelo, método que o HEC-RAS não contempla, ou pela representação de trechos menores e, teoricamente, com menor variação em seu comportamento cinético.

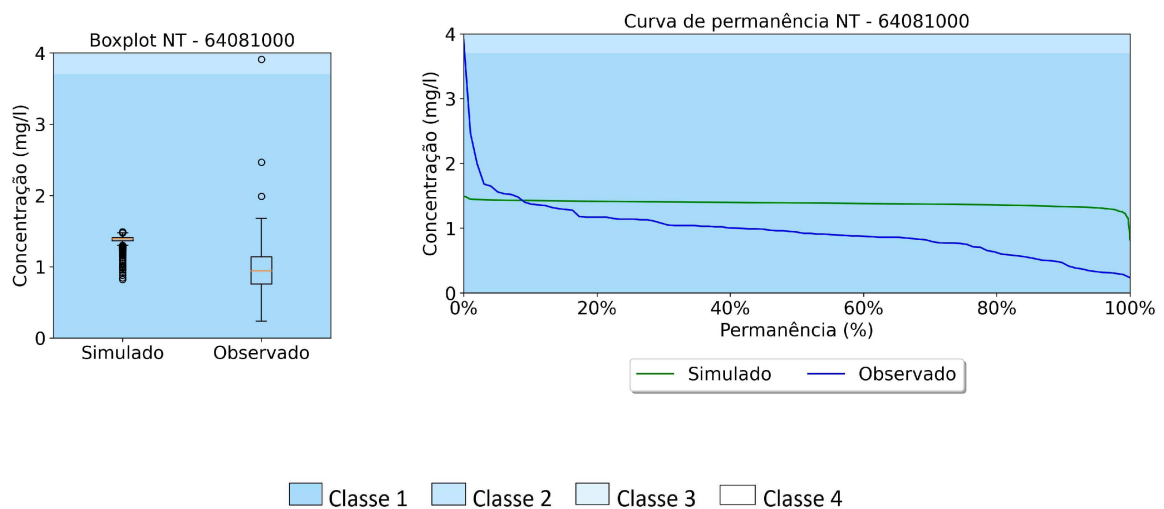
Esses resultados também complementam aqueles apresentados por outros estudos, que indicam que o efeito dos reservatórios na qualidade de água é de reter poluentes (Cunha-Santino et al., 2017; Tercini and Mélo Júnior, 2016) e, portanto, reduzir suas concentrações a jusante. Nota-se que esse comportamento é uma tendência, como indicado por da Silva et al. (2019), que estudaram o comportamento de seis reservatórios no Rio

Jauru, concluindo que os reservatórios tem influência na variação de concentração dos poluentes ao longo do sistema, mas de forma variada. Essa depende, principalmente, da geometria do reservatório e da barragem. O estudo conduzido por Wang et al. (2016) indica a relação direta entre a construção de reservatórios e piora na qualidade, em seu estudo aplicado a bacia do Rio Hianjiang (China). O autor adiciona que o represamento implicaria na não conformidade dos parâmetros de qualidade de água com os limites de classe do rio, conclusão que mostra a importância de uma análise detalhada para cada área de estudo. De forma geral, os resultados foram considerados satisfatórios, com permanência dentro dos limites de classe condizente com os dados observados.

#### 4.2.1.2 Nitrogênio Total

Os resultados de NT, apresentados entre as Figura 41 e 48, mostram concentrações simuladas próximas àsquelas observadas, indicando a capacidade que a metodologia proposta têm em avaliar esse parâmetro, com a mediana dos dados dentro do limite de classe 1.

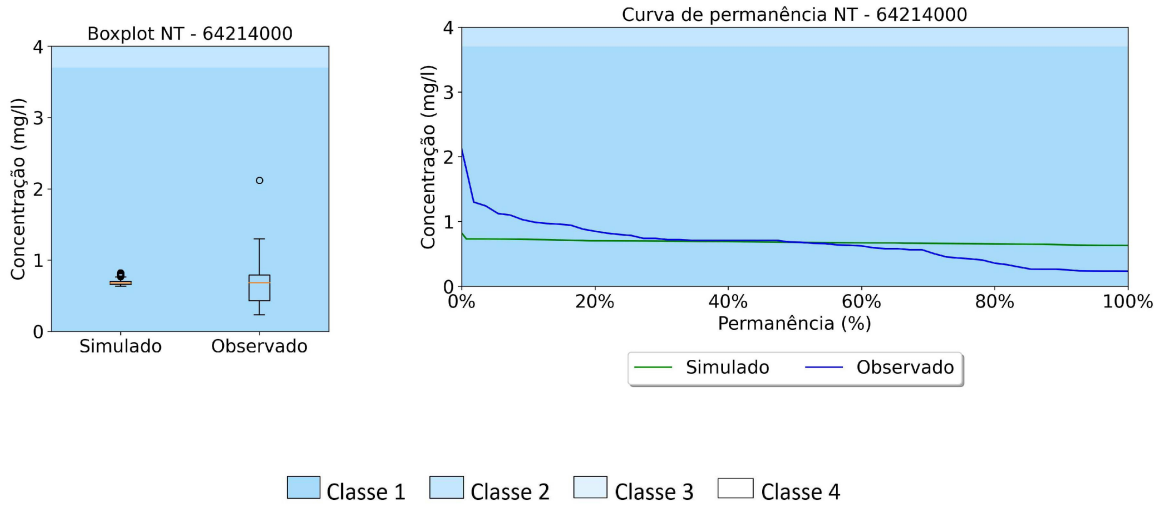
Figura 41: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

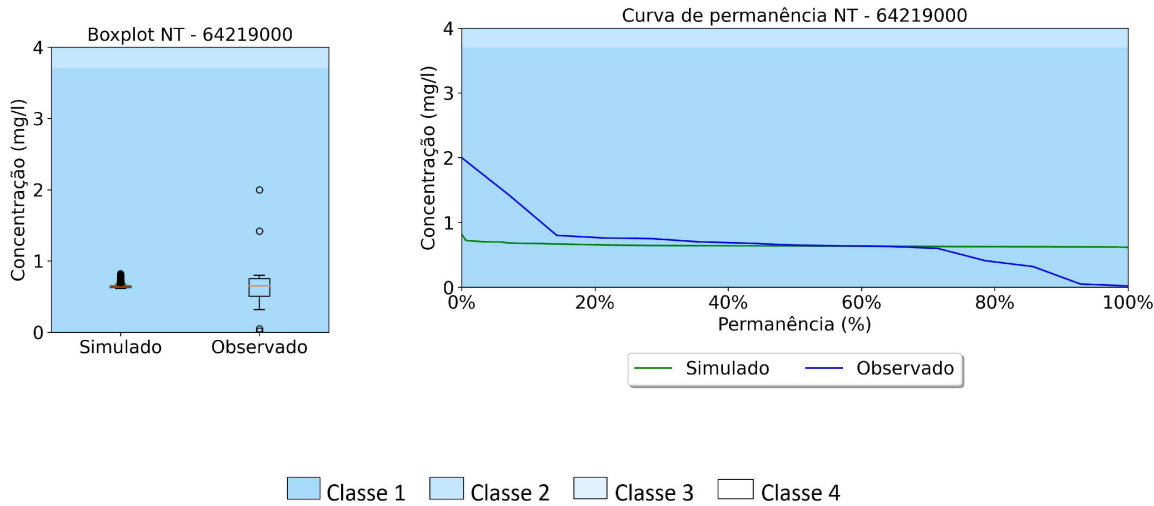


Figura 42: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



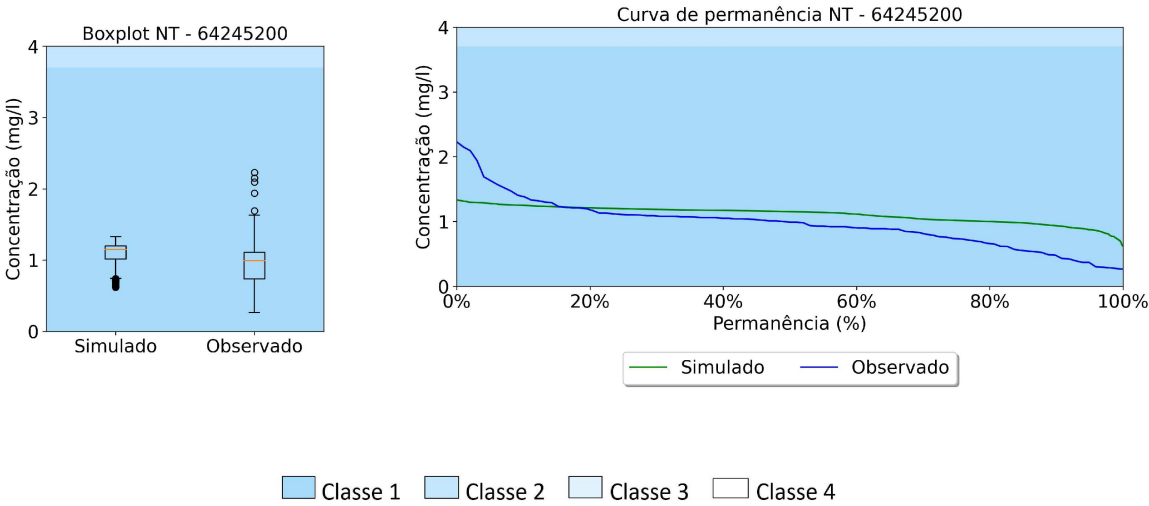
FONTE: O autor (2021).

Figura 43: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 61219000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



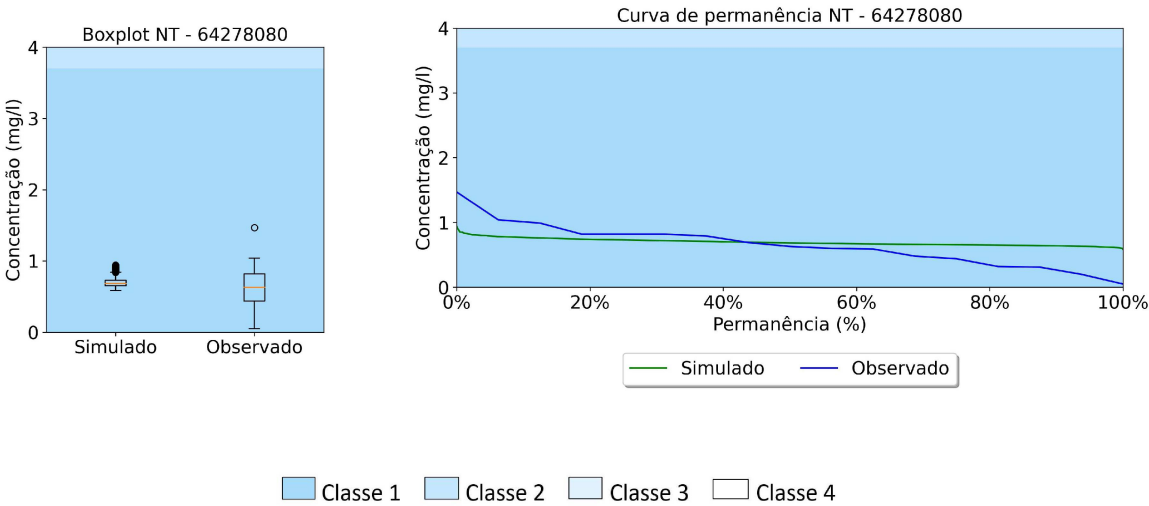
FONTE: O autor (2021).

Figura 44: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



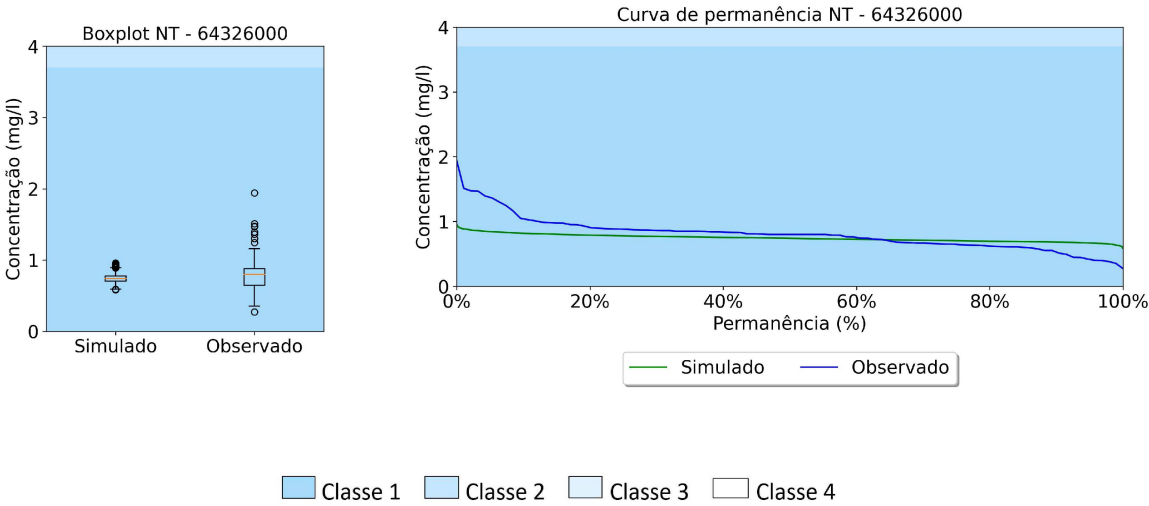
FONTE: O autor (2021).

Figura 45: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64278080 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



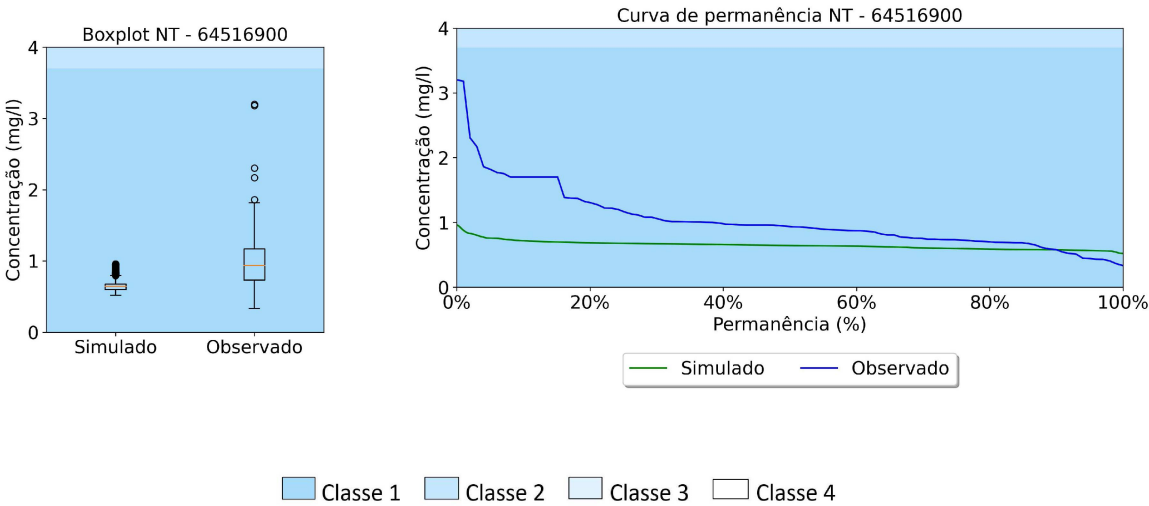
FONTE: O autor (2021).

Figura 46: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



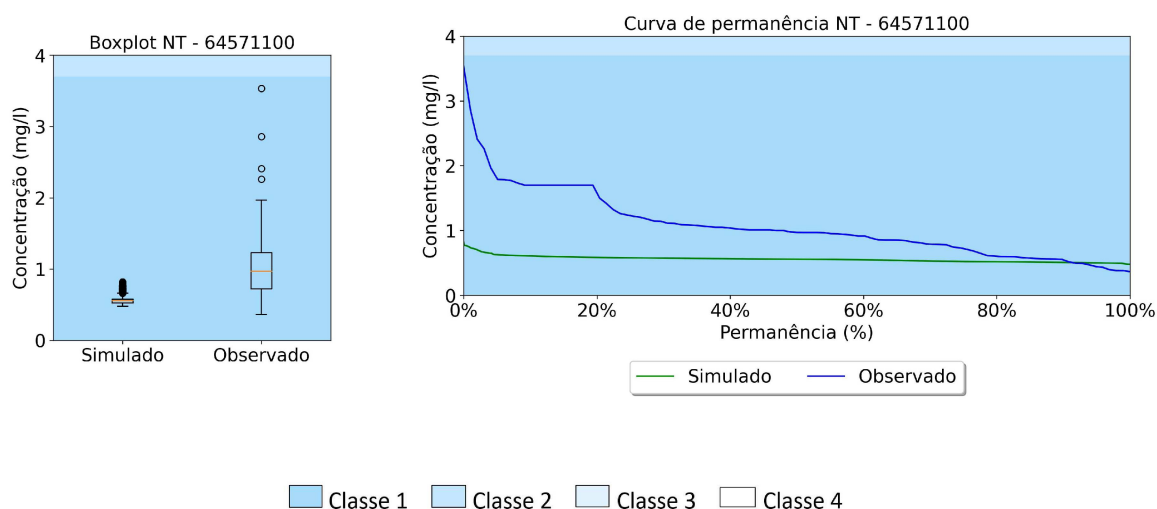
FONTE: O autor (2021).

Figura 47: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

Figura 48: Resultados das simulações de NT para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



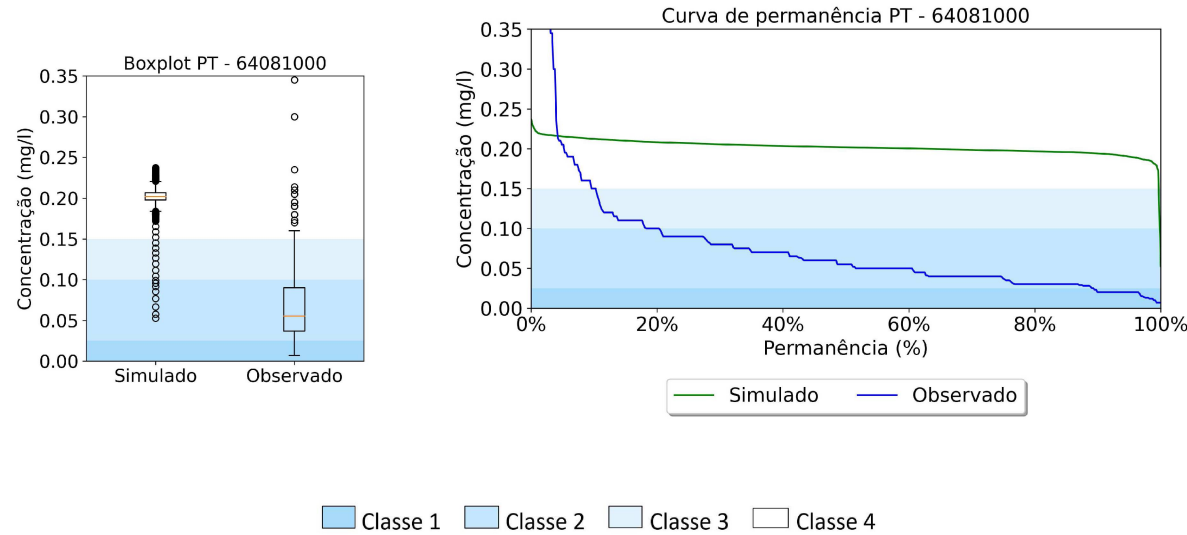
FONTE: O autor (2021).

Aqui também se destaca a posição da estação avaliada para análise dos resultados, com a 64081000 (cabeceira do rio Paranapanema) superestimando os valores, e a estação mais a jusante (64571100) subestimando. As causas para esse comportamento são as mesmas apontadas para DBO: os coeficientes de calibração constantes para toda a evolução espacial, e limitam a capacidade de representação dos processos de transformação e reação envolvidos no ciclo do nitrogênio para todos os trechos.

#### 4.2.1.3 Fósforo Total

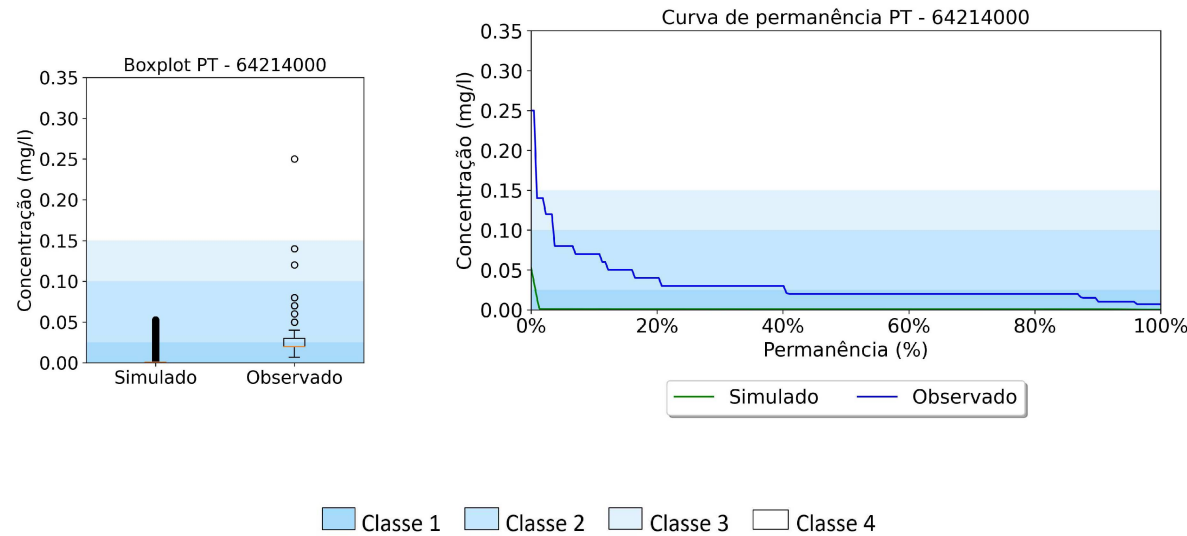
Fósforo foi o parâmetro de calibração mais desafiadora, retornando resultados com a maior variação. As concentrações observadas mostram certa variação, com medianas que variam entre 0,02 e 0,55 e dentro do esperado para classe 1 para as estações controladas por reservatórios e classe 2 para as de cabeceira, enquanto as variações obtidas nas simulações têm variação maior, mas comportamento semelhante (ver Figura 49 a 56).

Figura 49: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



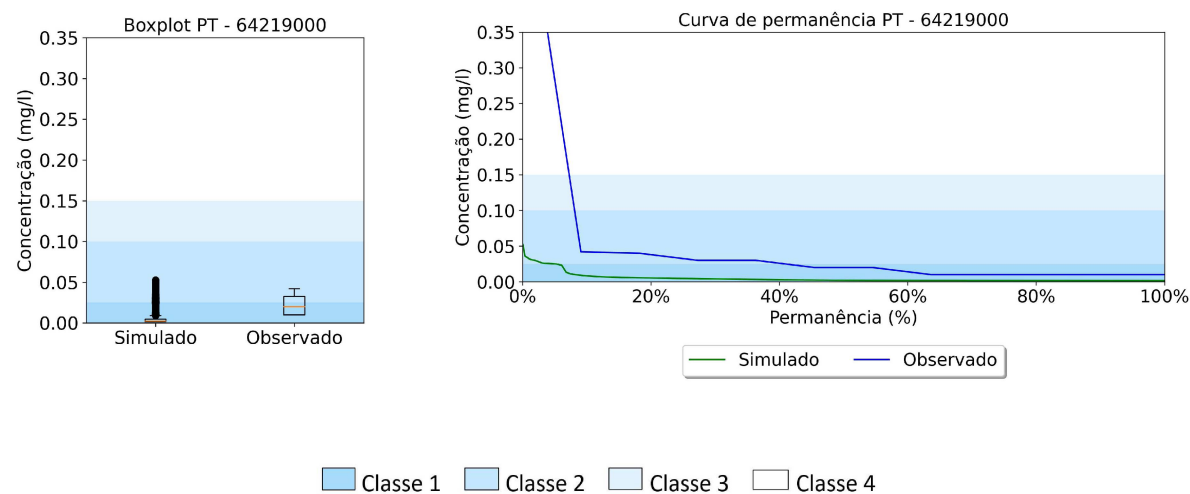
FONTE: O autor (2021).

Figura 50: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



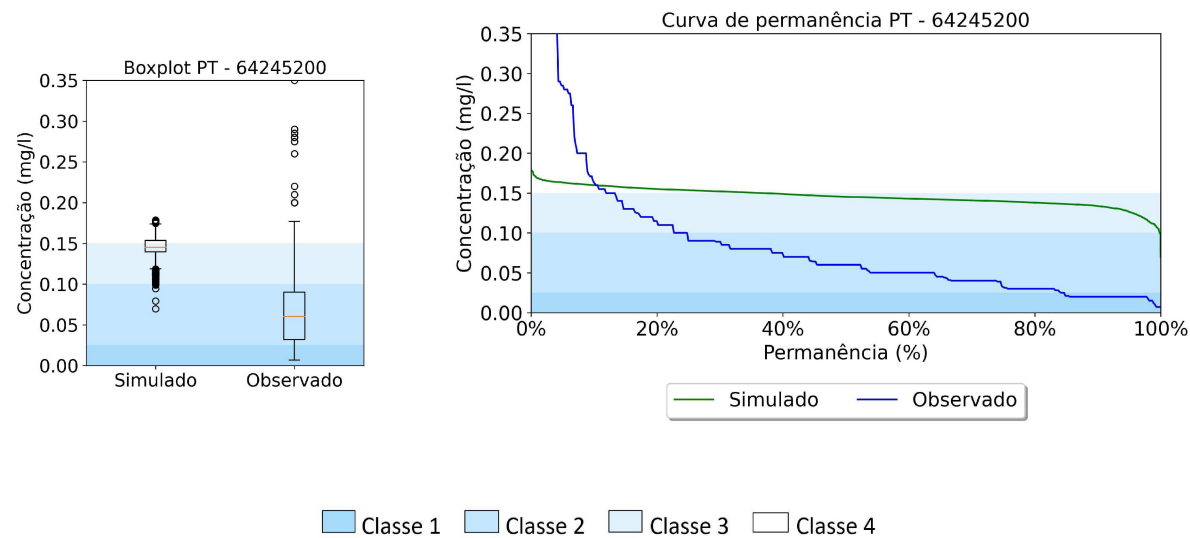
FONTE: O autor (2021).

Figura 51: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 61219000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



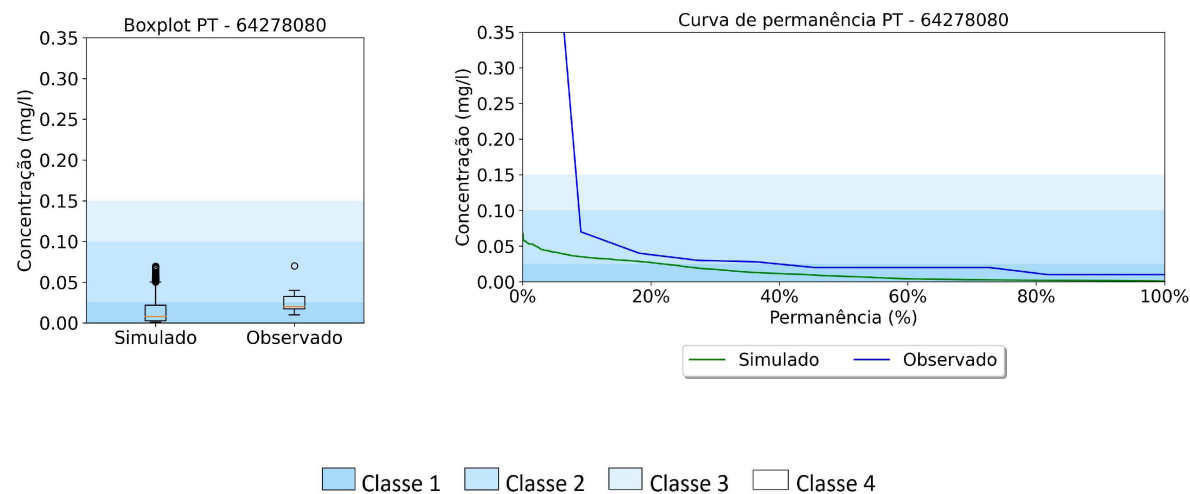
FONTE: O autor (2021).

Figura 52: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



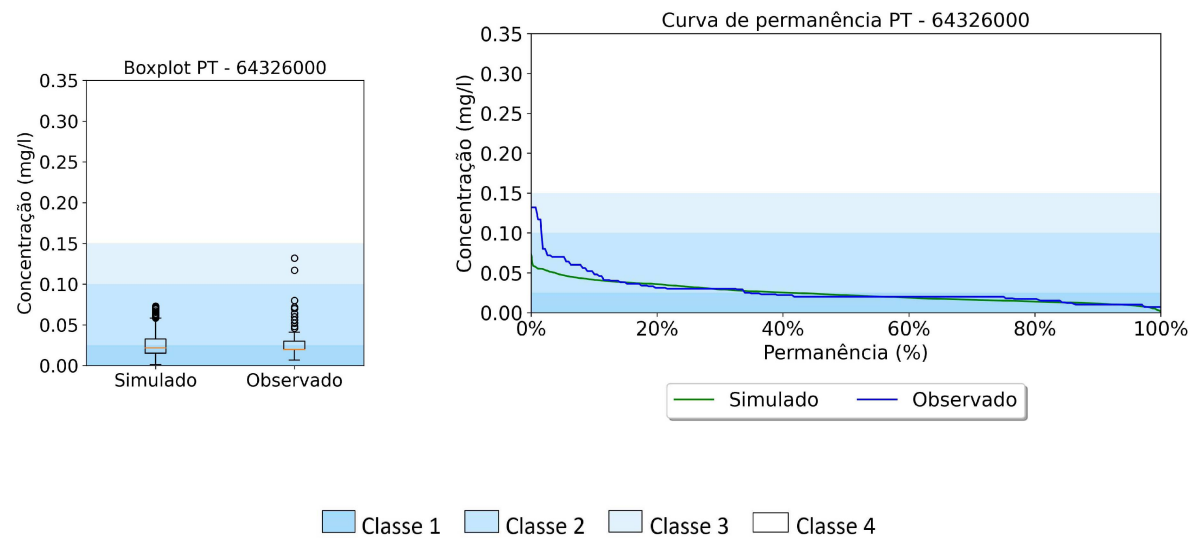
FONTE: O autor (2021).

Figura 53: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64278080 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



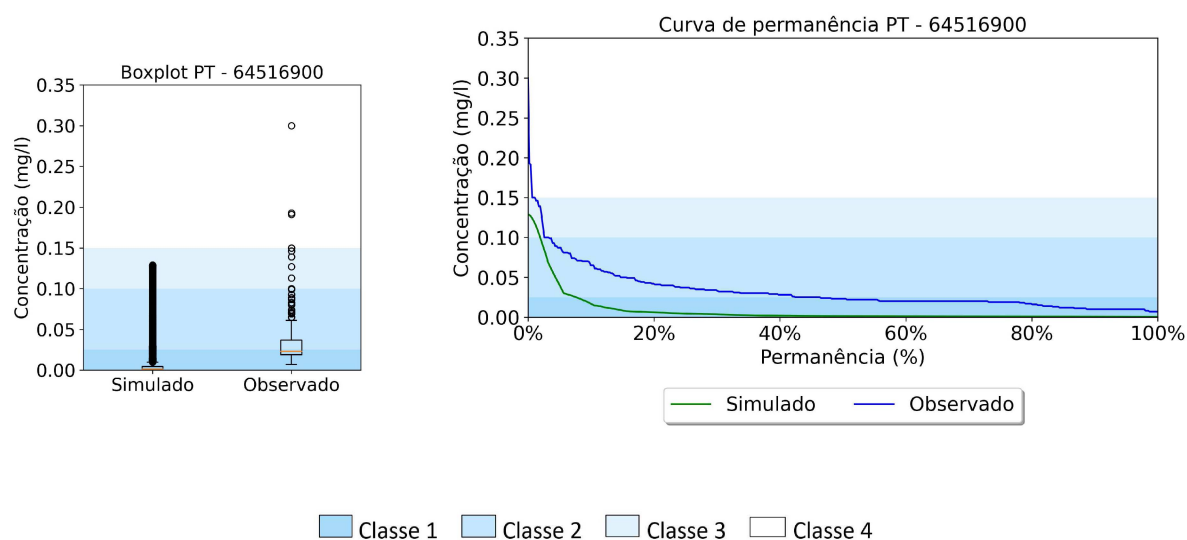
FONTE: O autor (2021).

Figura 54: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



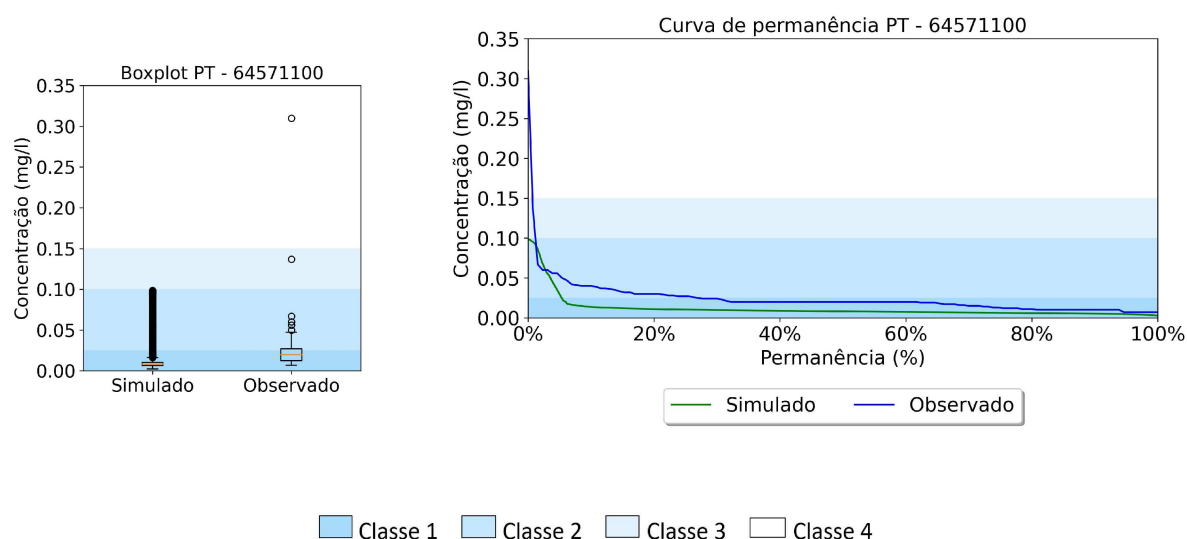
FONTE: O autor (2021).

Figura 55: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

Figura 56: Resultados das simulações de PT para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

Para PT também se nota o comportamento dos pontos nas regiões de cabeceira, mas de forma mais acentuada que para os demais parâmetros. Enquanto as concentrações

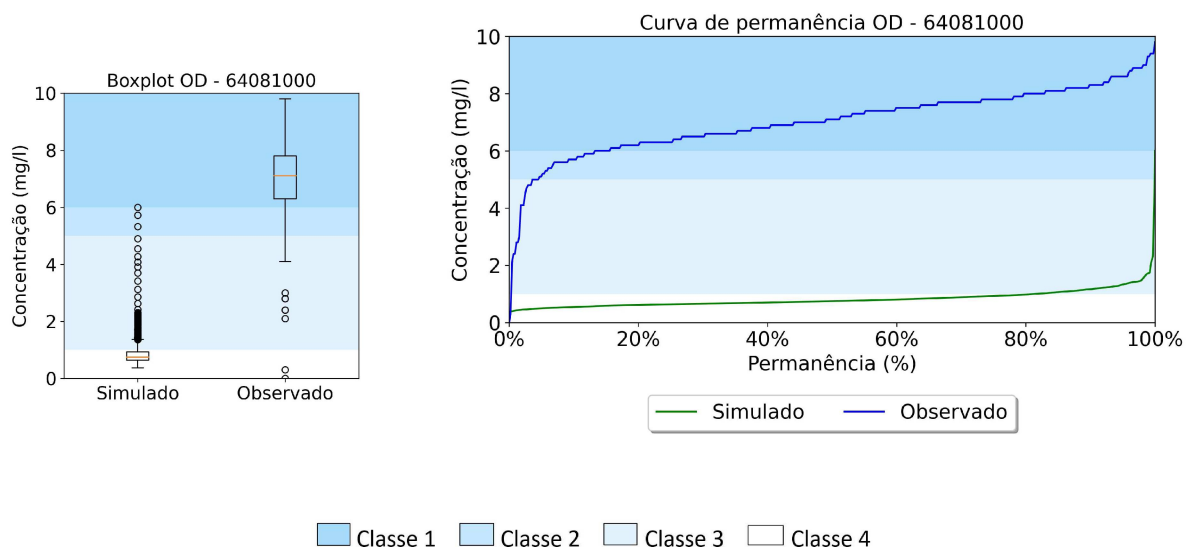


observadas para as estações 6408100 e 64245000 mostram permanência de cerca de 80% em classes 1 e 2, de fato superiores às concentrações observadas nas outras estações, suas simulações tem permanência inteiramente nas classes 3 e 4. Apesar da influência da posição, essa divergência de valores parece indicar que as concentrações de entrada nesses trechos foram superestimadas, ou que as equações utilizadas pelo HEC-RAS para o parâmetro não sejam capazes de replicar os fenômenos de transporte e transformação do parâmetro para a área de estudo. Destaca-se novamente o uso de coeficientes cinéticos constantes no tempo e espaço que o HEC-RAS usa, que interfere na calibração de alguns trechos. Os resultados da estação 64326000, logo após a junção dos rios e no centro da bacia, podem ser considerados os melhores para as simulações de fósforo, com valores simulados e curvas de permanência próximos daqueles observados, indicando que é possível obter bons resultados em simulações de PT usando HEC-RAS.

#### 4.2.1.4 Oxigênio Dissolvido

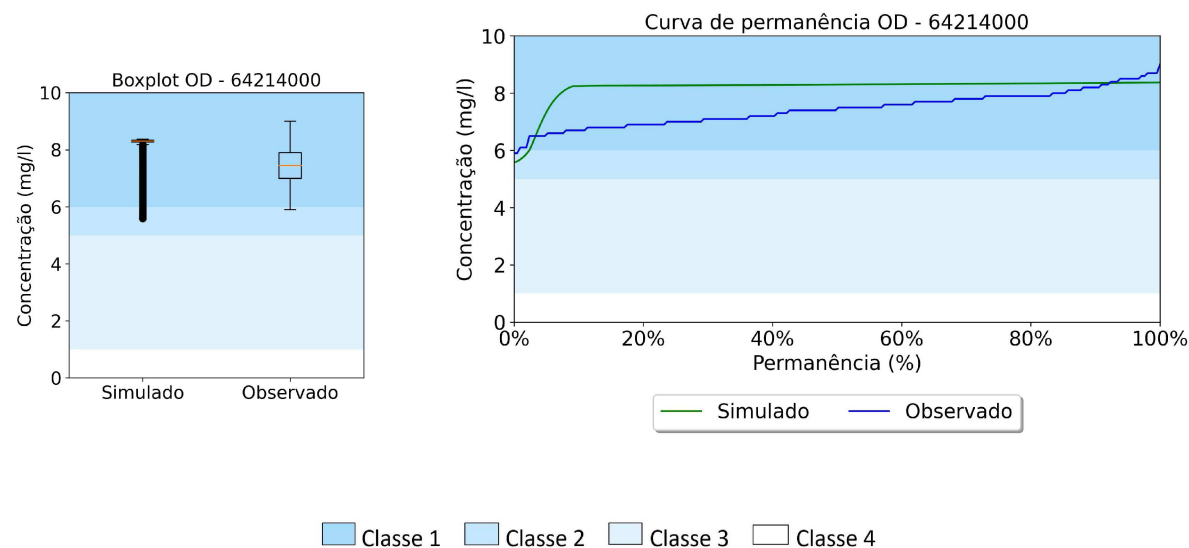
A simulação de oxigênio também retornou resultados variados, em geral subestimando as concentrações em relação às observadas, e são apresentados entre as Figura 57 e 62.

Figura 57: Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64081000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



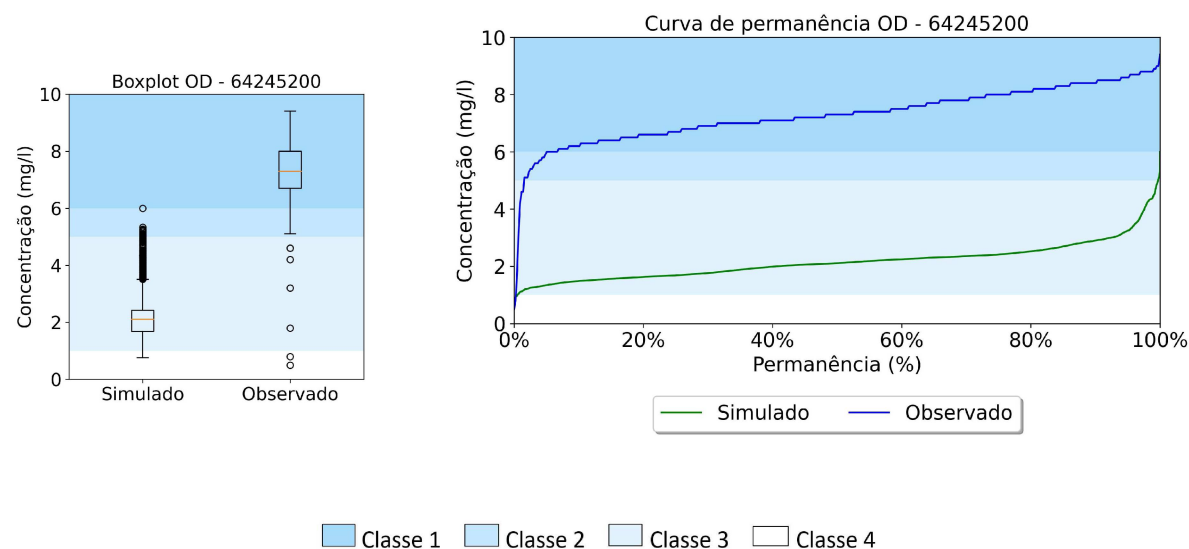
FONTE: O autor (2021).

Figura 58: Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64214000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



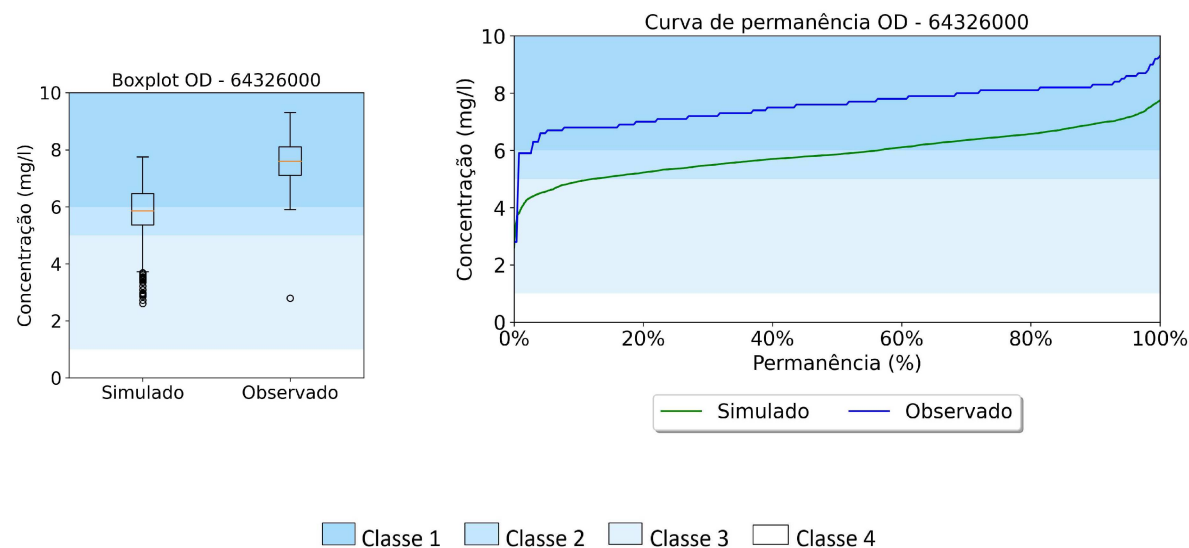
FONTE: O autor (2021).

Figura 59: Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64245200 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



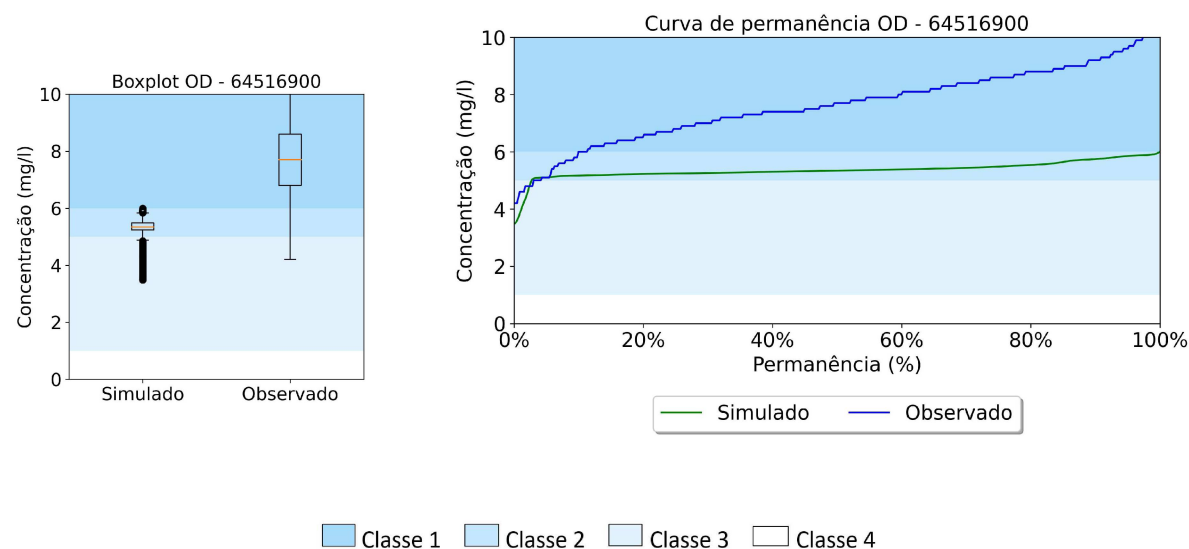
FONTE: O autor (2021).

Figura 60: Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64326000 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



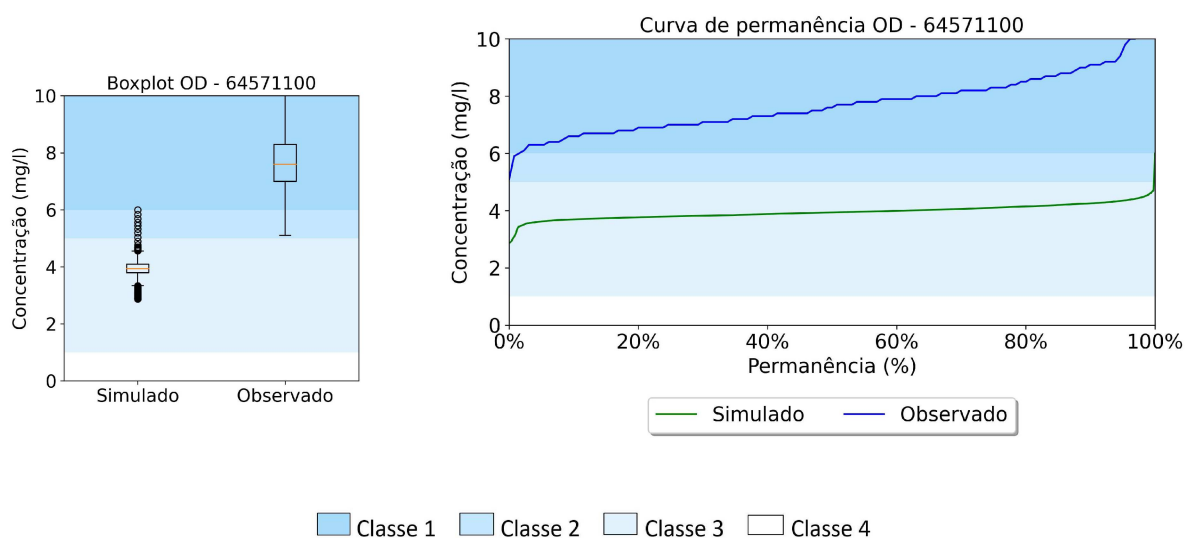
FONTE: O autor (2021).

Figura 61: Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64516900 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

Figura 62: Resultados das simulações de OD para a estação estrela 64571100 em curvas de permanência e boxplots, comparados com os dados históricos observados e limites de classe.



FONTE: O autor (2021).

As estações de cabeceira (64081000 - Figura 57 e 64245200 - Figura 59) novamente mostram simulações com valores mais críticos que os observados. Deve-se ressaltar que esse comportamento se repete na estação 64571100, na foz do Rio Paranapanema, e que mostrou resultados com concentrações mais baixas de poluentes do que aqueles observados para DBO, NT e PT. Somente a estação 64214000 tem a mediana dos valores simulados dentro da mesma classe que os observados. Esses resultados ilustram quão complexa a modelagem de oxigênio é, especialmente para esse cenário de simulação integrada rio-reservatório e com as características de calibração de qualidade da água do HEC-RAS. As concentrações de oxigênio são relacionadas com quase todos os outros parâmetros, característica visível pela tabela de parâmetros de modelagem de nutrientes do HEC-RAS (Figura 11), onde a única variável com que oxigênio não interage diretamente é fósforo. Estudos argumentam sobre o desafio envolvido em modelar oxigênio, citando que esse é associado com vários fenômenos físicos/biológicos e que pequenos erros de cálculo podem ter alto potencial de impacto no resultados das simulações (Mannina and Viviani, 2010).

A modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água usando o HEC-RAS revelou desafios, como a representação da geometria dos reservatórios e aportes laterais de carga,

além dos processos de transporte e transformação dos poluentes. As simulações se mostraram capazes de replicar as condições de qualidade da água indicadas pelo monitoramento dos rios Paranapanema e Itararé nos últimos anos para os parâmetros DBO e NT, que tem tempo de permanência nos dentro dos limites estipulados pelas classes similares entre os resultados simulados e observados. Para fins de gestão de recursos hídricos, os resultados foram considerados satisfatórios, mas para uma análise específica de trechos de rio ou reservatórios, as simulações podem não ser adequadas. Essa limitação pode ser contornada aplicando um modelo capaz de replicar as variações cinéticas ao longo do tempo e, em especial, espaço, ou simulando trechos menores, onde a variação espacial seria menor. Para simulações mais precisas de PT e OD, sugere-se essas mesmas adaptações.

Resultados mais próximos dos observados são possíveis usando HEC-RAS, mas atentando-se a limitação a representatividade dos coeficientes cinéticos. A metodologia proposta por Fernandes et al. (2020b), por exemplo, conduz as simulações por trecho, portanto com menor variação nos coeficientes cinéticos, mas implicando em não aplicar a metodologia proposta de integrar rio e reservatório. Conclui-se que a proposta de integrar rio e reservatórios retornaria resultados melhores caso a variação espacial dos coeficientes cinéticos fosse possível, o que não é viável no HEC-RAS, conduzindo a simulação em trechos, portando em várias simulações com geometrias e condições de contorno próprias.

#### **4.2.2 Transição Rio - Reservatório**

Os resultados dos trechos de transição rio - reservatório e das simulações dos reservatórios são apresentados entre as figuras 63 e 78. Os gráficos relacionam a concentração dos poluentes, na ordenada da direita apresenta-se a concentração do poluente, associada a boxplots espaçados em 10 quilômetros das simulações do HEC-RAS, e pontos que representam a mediana dos valores observados de NT, PT e OD, tomados ao longo do ano de 2011 e tendo como função apresentar o comportamento do reservatório (GIA, 2013). Na ordenada da esquerda apresenta-se o tempo a percorrer até a barragem, associado a linha “Distância da Barragem”.

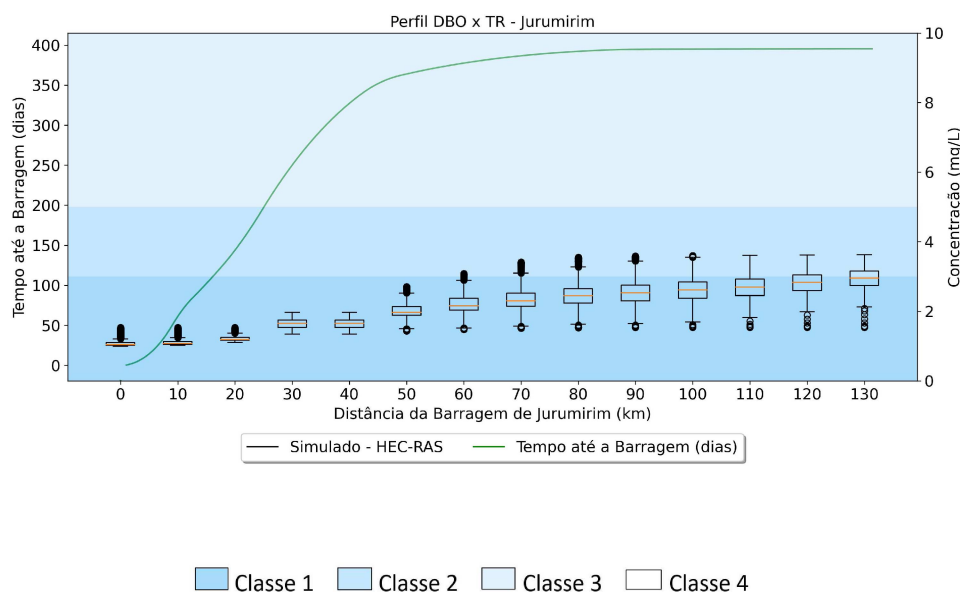
Enquanto mais afastada da barragem, a curva de TR é horizontal e representa velocidades de escoamento maiores, condizentes com o escoamento de rio e que não contribuem com o tempo de residência, como a região acima de 80km da barragem de Capivara (Figura 71). O trecho em que a inclinação da curva muda, pode ser considerado a região

de transição, onde o escoamento tem suas velocidades reduzidas, como o trecho entre 60 e 80km de distância da barragem de Capivara (figura 71). O trecho com a linha já inclinada e de forma constante representam aqueles de reservatório, onde as velocidades são próximas de zero, como aquele entre 0 e 60km da barragem de Capivara (Figura 71).

#### 4.2.2.1 Rio Paranapanema - Jurumirim

As simulações de DBO (Figura 63) não tem dados observados para comparar, mas as simulações indicam uma redução gradual. Mesmo que esse resultado corrobore com parte da bibliografia (Cunha-Santino et al., 2017), ele não pode ser valido por falta de dados.

Figura 63: Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim.

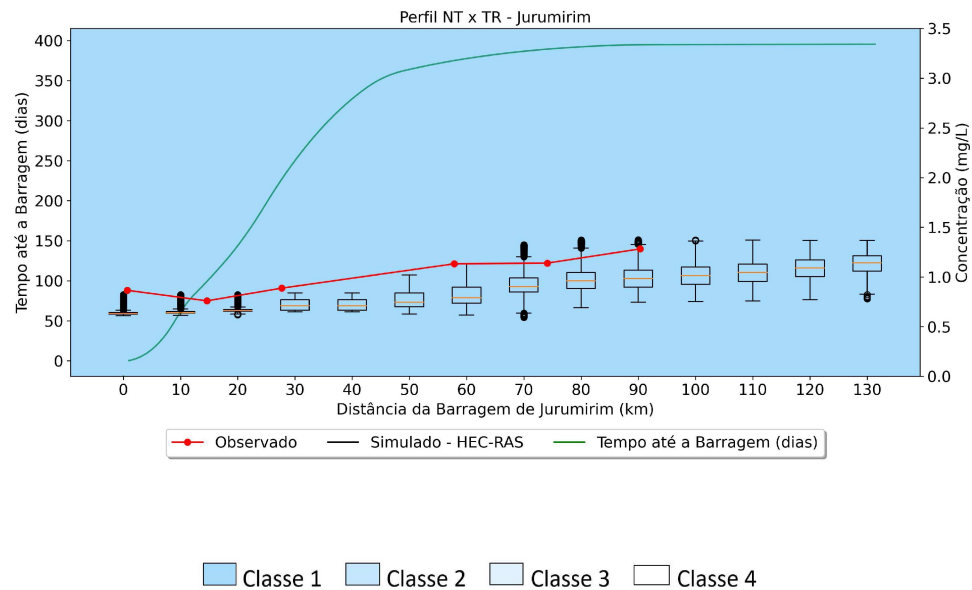


FONTE: O autor (2021).

A análise das concentrações de NT (Figura 64) ao longo da região de transição e reservatório mostra que, para esse parâmetro e esse reservatório, o modelo consegue replicar de forma satisfatória as concentrações observadas. Esse resultado se destaca entre os demais e representa a capacidade das equações de Saint-Venant e ADR em simular a

geometria proposta. Acredita-se que esse tipo de resultado poderia ser alcançado nos demais reservatórios ao se contornar a questão dos coeficientes cinéticos constantes.

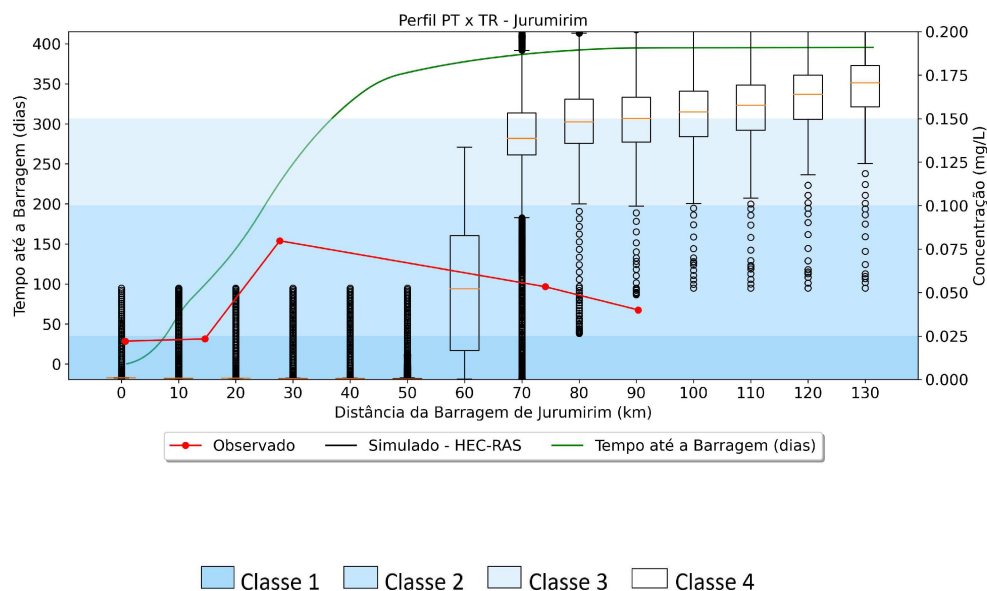
Figura 64: Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim.



FONTE: O autor (2021).

As simulações de PT (Figura 65) retornaram séries de concentrações não representativas daquelas observadas no reservatório. Considerando a grande variação na concentração de PT ao longo do reservatório, esse resultado indica que as equações de Saint-Venant e ADR não são capazes de replicar o comportamento do poluente no trecho.

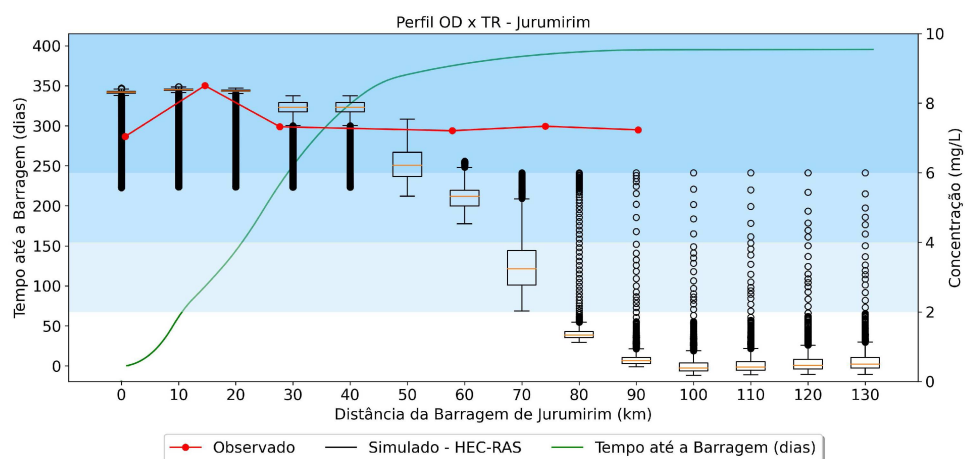
Figura 65: Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim.



FONTE: O autor (2021).

Assim como para PT, os resultados de OD (Figura 66) mostram grande variação ao longo do reservatório, sendo as concentrações baixas no início e mais elevadas final. As concentrações simuladas de oxigênio mais próximas da barragem são próximas aquelas observadas, mas as curva não se comportam de forma similar, podendo indicar que os resultados convirjam meramente pela proximidade da concentração de saturação.

Figura 66: Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Jurumirim.





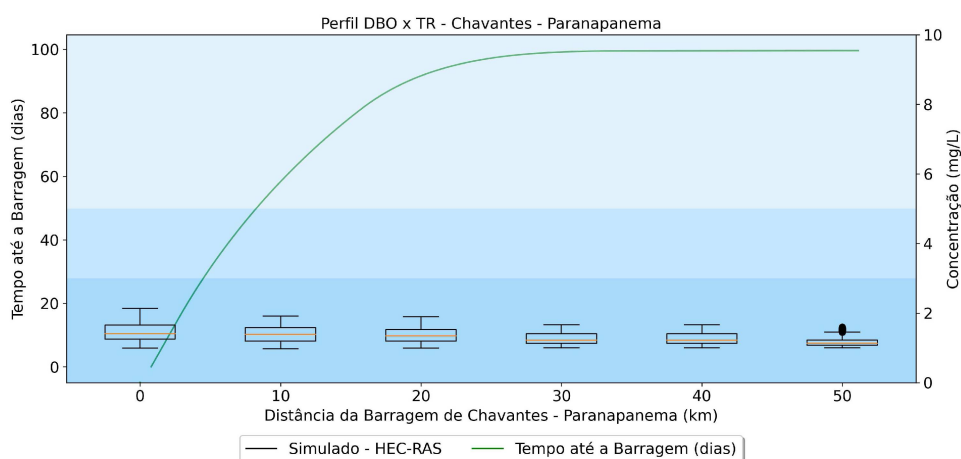
Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

#### 4.2.2.2 Rio Paranapanema - Chavantes

As concentração simuladas de DBO (Figura 67) para a região de transição entre o Rio Paranapanema e o reservatório de Chavantes são quase constantes, mas aumentando gradualmente, comportamento contrário aquele visto no reservatório de Jurumirim (Figura 63).

Figura 67: Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes.

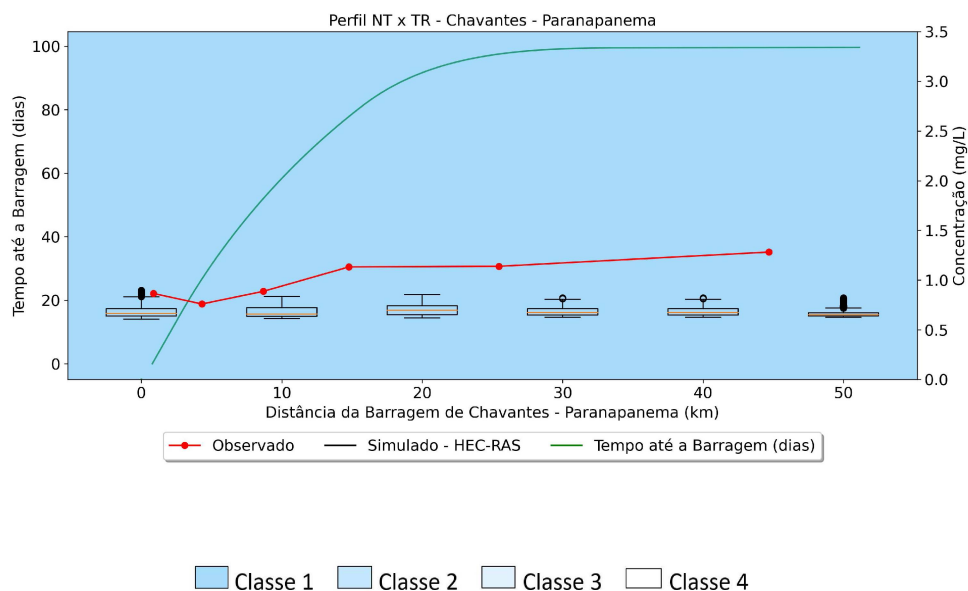


Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

Assim como no reservatório de Jurumirim (Figura 64), as concentração de NT (Figura 68) simuladas são próximas aquelas observadas, mas aqui a correlação entre as curvas é menor.

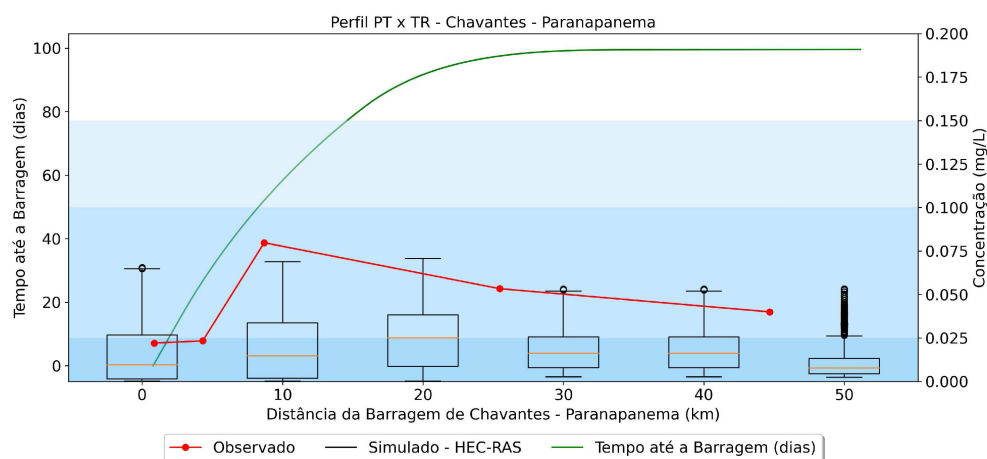
Figura 68: Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes.



FONTE: O autor (2021).

Ao contrário do observado em Jurumirim (Figura 65), as simulações de PT para o Rio Paranapanema e reservatório de Chavantes (Figura 69) tem correlação, com concentrações crescentes entre 50 e 10 quilômetros da barragem, reduzindo posteriormente. Essa relação pode indicar a capacidade do método aplicado em simular o comportamento observado no trecho, mas limitado pela calibração.

Figura 69: Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes.

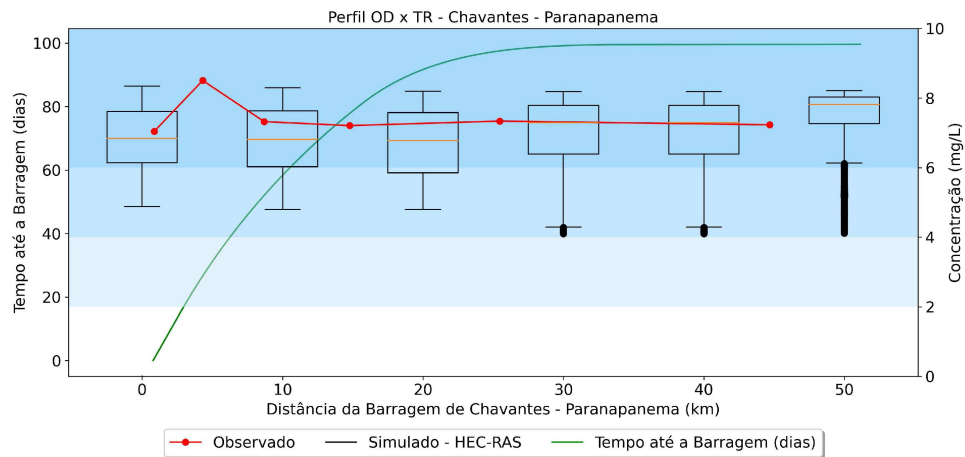


Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

Os resultados de OD (Figura 70) tem valores próximos aqueles observados, mas as curvas mostram pouca correlação, com as concentrações observadas aumentando mais próximas a barragem, enquanto as simuladas diminuem. Mesmo que os valores sejam próximos, pode ser novamente por conta da proximidade a concentração de saturação.

Figura 70: Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Chavantes.



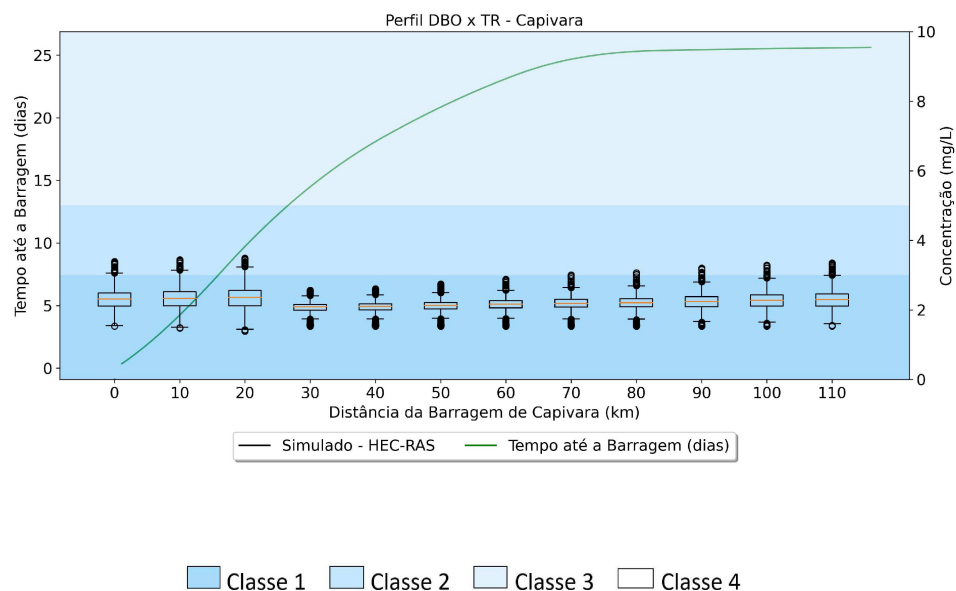
Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

#### 4.2.2.3 Rio Paranapanema - Capivara

As simulações de DBO (Figura 71) ao longo da transição Rio Paranapanema - Reservatórios de Capivara tem comportamento distinto das demais, com concentrações do poluente reduzindo ao longo do reservatório, mas aumentando no final.

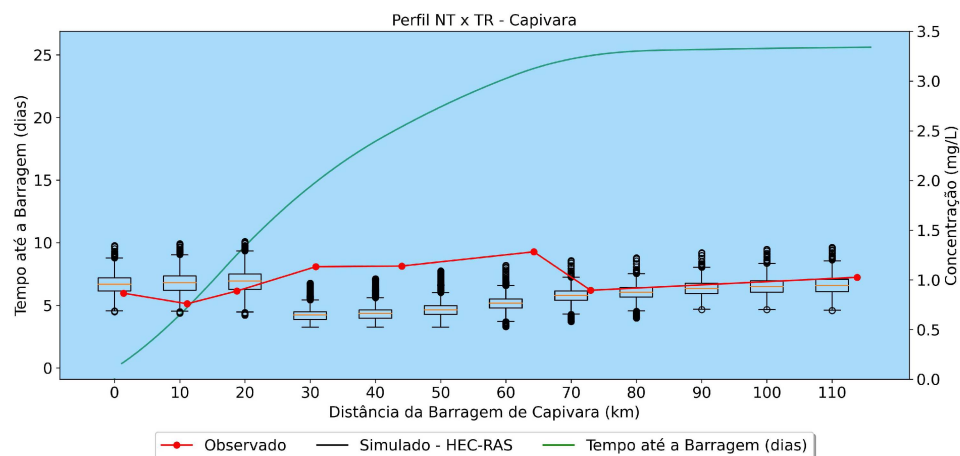
Figura 71: Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Capivara.



FONTE: O autor (2021).

Assim como para DBO e PT, as concentrações de NT (Figura 72) tendem a reduzir até 30 quilômetros da barragem, então aumentando e voltando a reduzir, como se houvesse um lançamento de carga pontual ali. Ao contrário dos demais reservatórios (Figura 64 e Figura e 68), o comportamento das séries de concentrações observadas é contrário ao simulado.

Figura 72: Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Capivara.

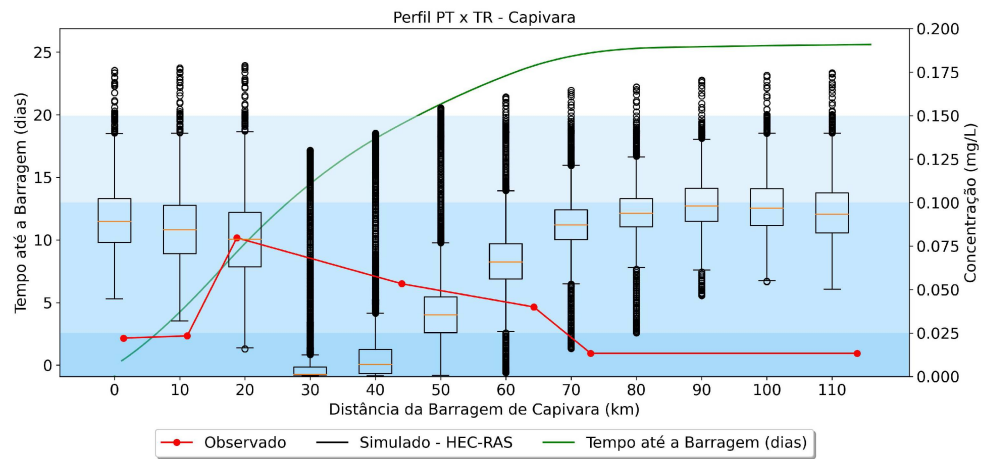


Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

As séries de concentrações simuladas de PT (Figura 73, assim como as de DBO e NT, tem comportamento oposto as séries de concentrações observadas. Pode-se notar que os poluentes tem, em todos os casos, variações espaciais de concentrações parecidas.

Figura 73: Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Capivara.

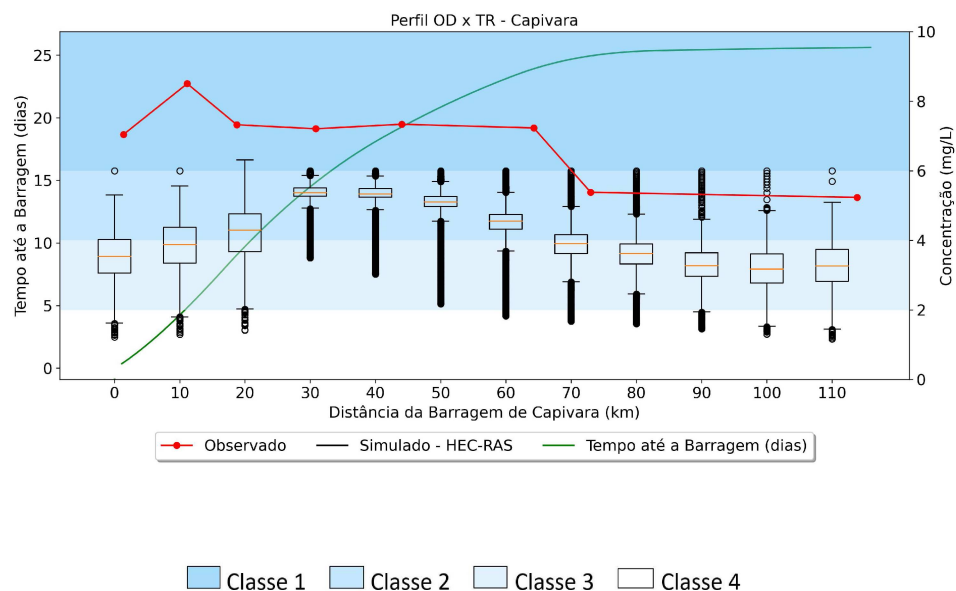


Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

As simulações de OD (Figura 74) tem séries de concentrações que variam no espaço de forma similar às séries de concentrações observadas, mas com valores inferiores. Apesar dessa correlação, esse resultado mostra certa proporcionalidade entre as concentrações de OD e PT, NT e DBO, ao contrários do observado nas demais estações, que mostram OD como sendo inversamente proporcional aos poluentes.

Figura 74: Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Paranapanema - Reservatório de Capivara.

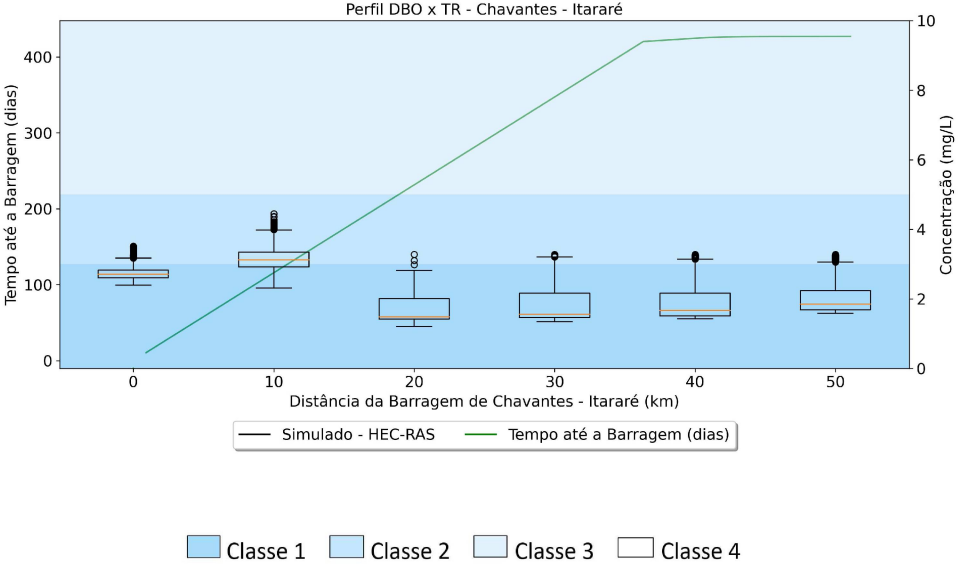


FONTE: O autor (2021).

#### 4.2.2.4 Rio Itararé - Chavantes

A análise da região de transição desse trecho é diferente dos demais, visto que a curva do tempo até a barragem varia de forma abrupta no quilômetro 36, indicando que a geometria muda de lótico para lântico bruscamente e com ausência da região de transição.

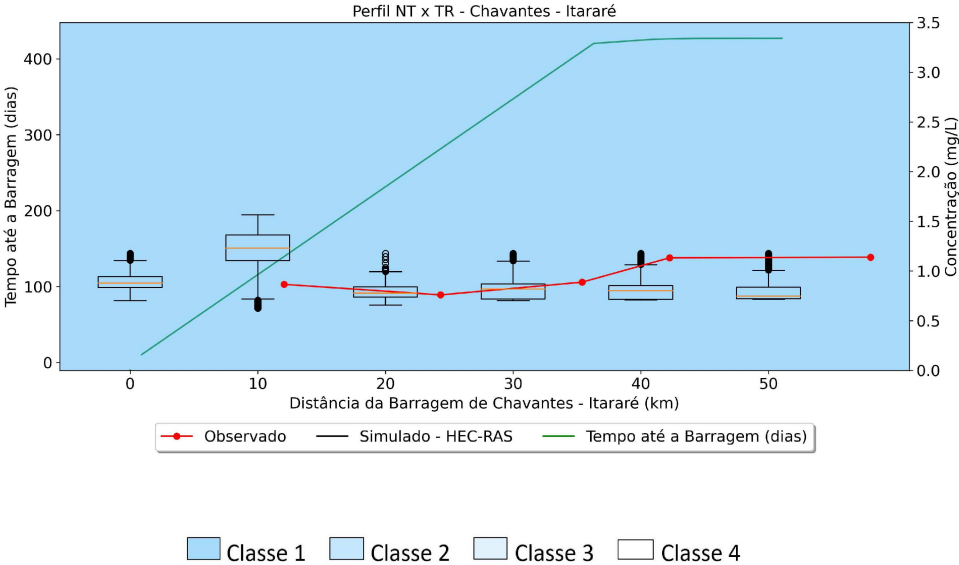
Figura 75: Resultados das simulações de DBO para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes.



FONTE: O autor (2021).

As simulações de NT (Figura 76) geram concentrações próximas as observadas, complementando os resultados apresentados para os demais reservatórios de que esse é o poluente melhor representado pela metodologia proposta.

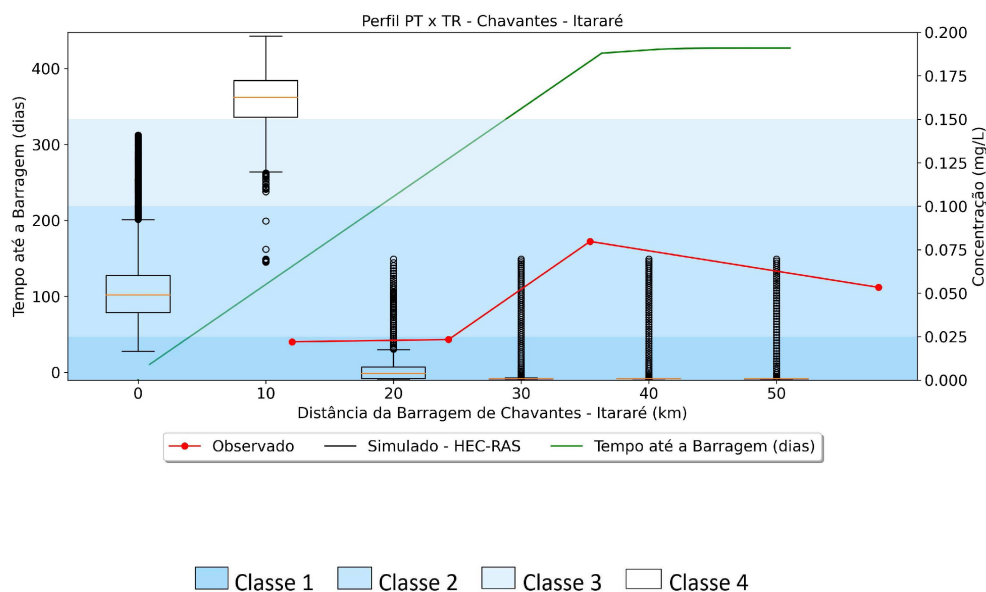
Figura 76: Resultados das simulações de NT para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes.



FONTE: O autor (2021).

As simulações de PT (Figura 77) tem variações espaciais e temporais distintas daquelas observadas, complementando os resultados apresentados para os demais reservatórios de que esse é o poluente pior representado pela metodologia proposta.

Figura 77: Resultados das simulações de PT para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes.

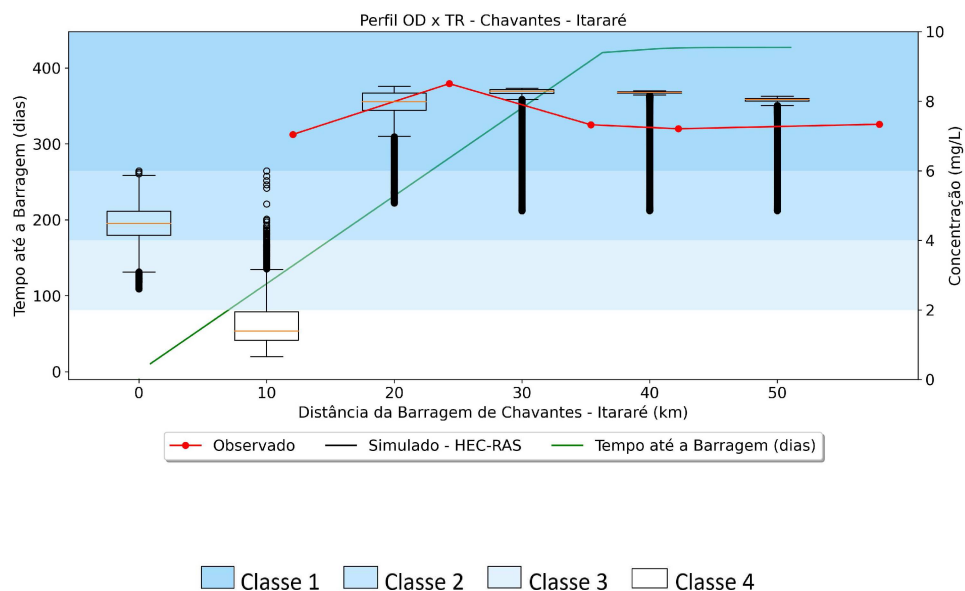


FONTE: O autor (2021).

As simulações de NT (Figura 78) geram concentrações próximas as observadas para os pontos com dados observados, mostrando similaridade na variação espacial das concentrações.



Figura 78: Resultados das simulações de OD para região de transição Rio Itararé - Reservatório de Chavantes.



FONTE: O autor (2021).

O uso do HEC-RAS para simulações hidrodinâmicas e de qualidade da água permite avaliar como o programa lida com a metodologia e geometria usados. Integrando rio-reservatório e combinando o uso de batimetria e MDE para gerar seções transversais, os resultados indicam que cada reservatório tem suas características próprias. O reservatório de Jurumirim teve grande impacto nas concentrações de DBO, PT, NT e OD ao longo de seu comprimento, com concentrações de poluentes diminuindo ao longo da região de transição e do reservatório, enquanto oxigênio aumentou até se estabilizar em um valor próximo a concentração de saturação. Esse resultado corrobora com os apresentados por Tercini and Mélo Júnior (2016), que comenta o efeito dos reservatórios em reduzir as concentrações de DBO a jusante, e com os de Cunha-Santino et al. (2017), que avaliou um sistema de seis reservatórios em cascata que, em sua maioria, tiveram concentrações de poluentes inferiores mais perto de sua barragem que na entrada. Esse autor, entretanto, também ressalta o efeito dos reservatórios em acumular poluentes, assim como Chen et al. (2019), que não é visto em Jurumirim.

O efeito de acumulação dos poluentes, entretanto, é observado dos demais reservatórios, com concentrações de poluentes que diminuem ao longo da superfície de transição mas que tendem a aumentar ao longo do reservatório, assim como sugerido por Cunha-

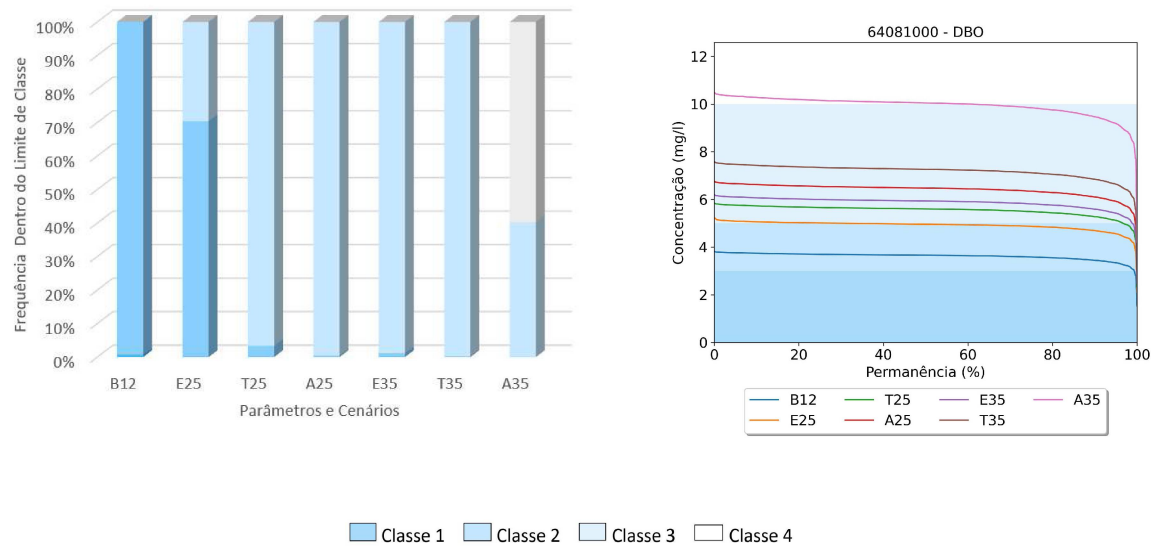
Santino et al. (2017) em seus outros reservatórios. Nota-se que essa relação acumulação, concentração dos poluentes ao longo dos reservatórios e efeito no trechos a jusante de rios é complexa, dependendo tanto de fatores físicos das usinas, como altura da tomada d'água, tempo de retenção e tamanho (da Silva et al., 2019), quanto de sua operação (Tranmer et al., 2020; Wang et al., 2018).

### 4.3 Cenários Futuros

A comparação dos cenários permite associar as alterações das cargas com o tempo de permanência dos pontos dentro das concentrações limite de cada classe, possibilitando avaliar quais parâmetros apresentam maior sensibilidade a essas alterações. Esses resultados podem servir como base para definição de ações de redução de cargas, visando garantir que o rio possa manter ou atingir os padrões de qualidade da água necessários para atender seus usos mais exigentes. Esses resultados são apresentados entre as figuras 79 e 108, na forma de gráfico de barras de tempo de permanência nas classes, e curvas de permanência das concentrações simuladas. As siglas significam: cenário base 2012 (B12), o mesmo para qual os resultados de qualidade da água foram apresentados, enquanto os demais representam os cenários futuros de aumento no aporte de cargas, sendo esse estagnado (E25 e E35), tendencial (T25 e T35) e acelerado (A25 e A35). Os números representam os anos 2025 (E25, T25 e A25) e 2035 (E35, T35 e A35), conforme descrito na seção 3.4.3.

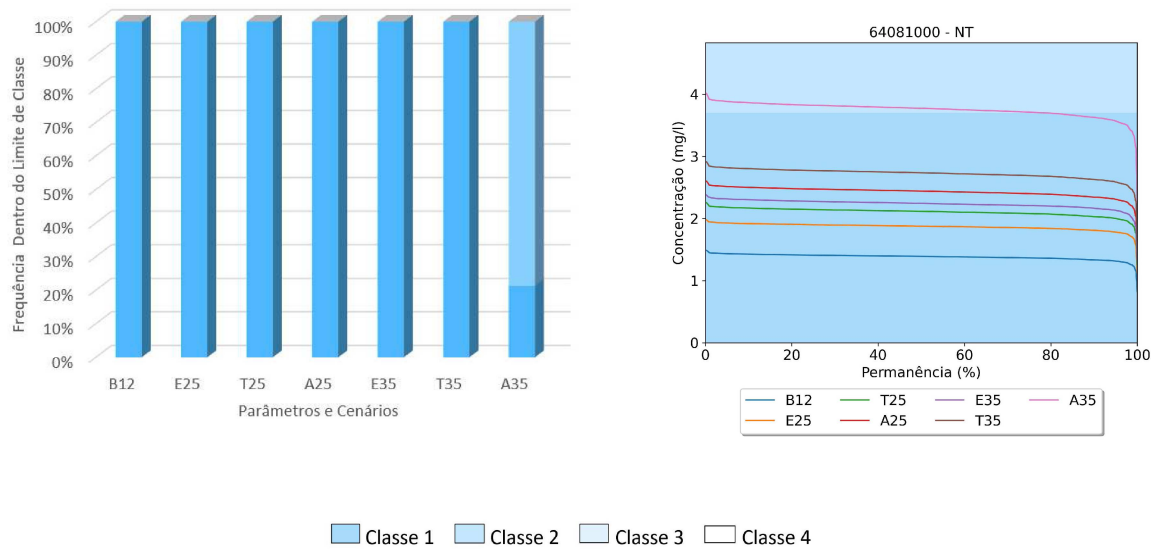
Os resultados da estação 64081000, apresentados entre as figuras 79 e 82 mostram o efeito que o aumento no aporte nas cargas de poluentes pode ter nos rios. Para DBO, por exemplo, ilustrado na Figura 79, a estação mostra 100% do tempo dentro dos limites de classe 2 para o cenário base, mas no cenário T25 a estação passaria a ter quase 100% do tempo fora dos limites de classe 2, e dentro de classe 3.

Figura 79: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000.



FONTE: O autor (2021).

Figura 80: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000.

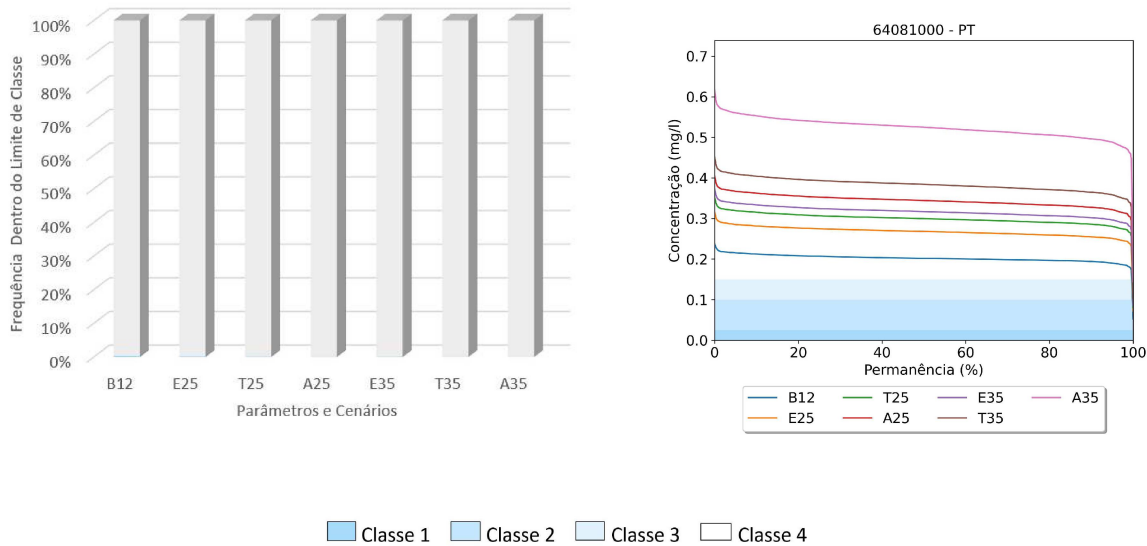


FONTE: O autor (2021).

Os resultados das simulações de PT para a estação 64081000 (Figura 81) ilustram o efeito da limitação da calibração do modelo, com séries de concentrações para os cenários

futuros mais elevadas do que o esperado, resultado esperado por conta dos resultados das simulações do cenário base, que já retornaram concentrações acima das esperadas.

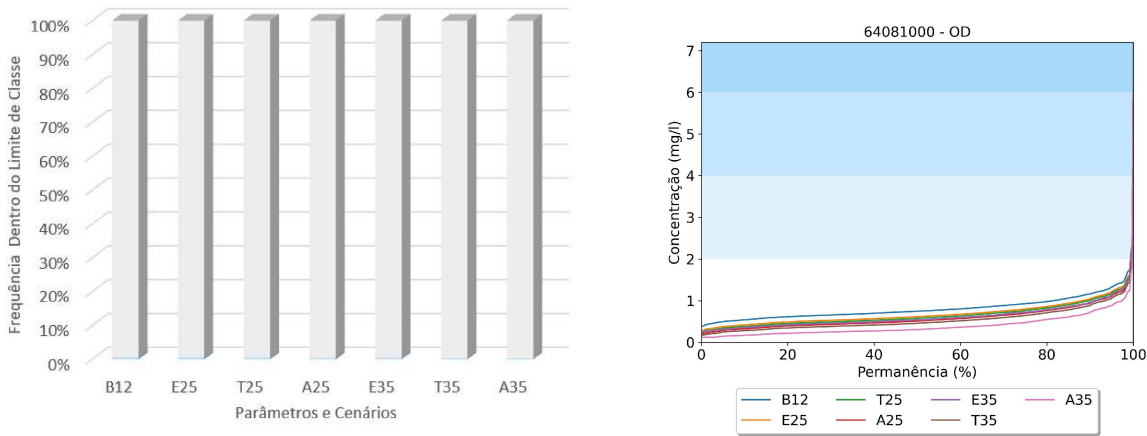
Figura 81: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000.



FONTE: O autor (2021).

As simulações de oxigênio (Figura 82) para a estação 6408100, se destacam das demais para os cenários futuros por conta da baixa diferença nas concentrações entre os cenários. Esses resultados, com concentrações simuladas inferiores ao limite de classe 3, não são representativos da qualidade da água observada no trecho.

Figura 82: Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64081000.



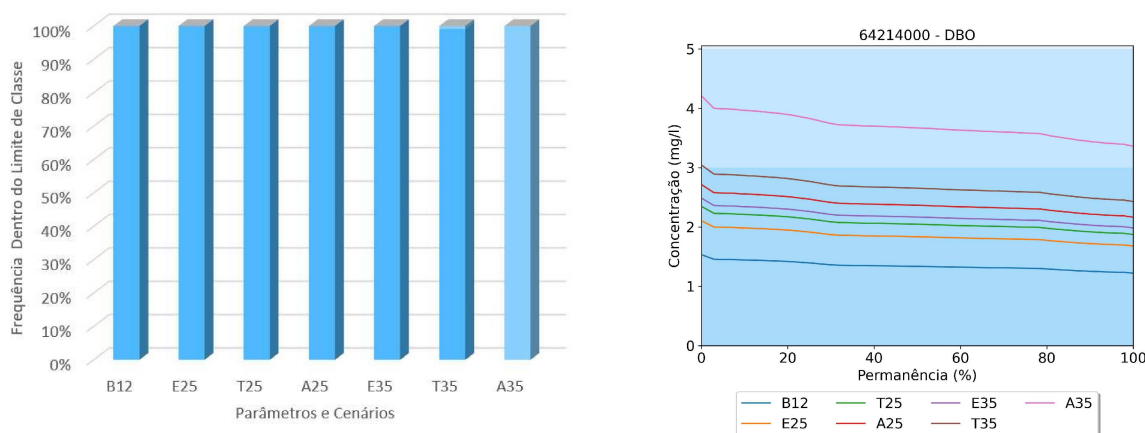
Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

Como indicado na seção 4.2, os trechos de cabeceira tiveram concentrações de poluentes acima das observadas, comportamento que se estendeu aos cenários futuros, fruto dos coeficientes cinéticos constantes usados no modelo HEC-RAS.

Os resultados das simulações para os cenários futuros da estação 64214000, que se destacou pela boa calibração para DBO e NT, são apresentados entre as figuras 83 e 86. Esses resultados mostram um ponto capaz de absorver o aumento no aporte de cargas e se manter dentro dos limites de classe 1, sendo DBO o poluente mais crítico, mas se mantendo dentro dos limites de classe 2 no cenário A35. A calibração de PT (Figura 85) não foi eficiente, portanto os resultados das simulações no ponto são inconclusivas.

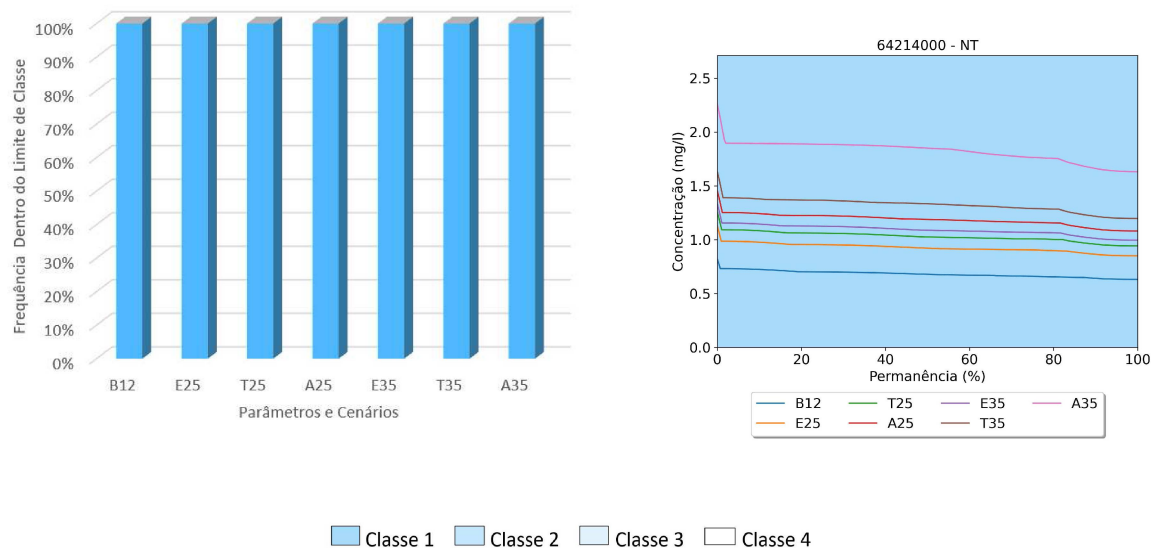
Figura 83: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000.



Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

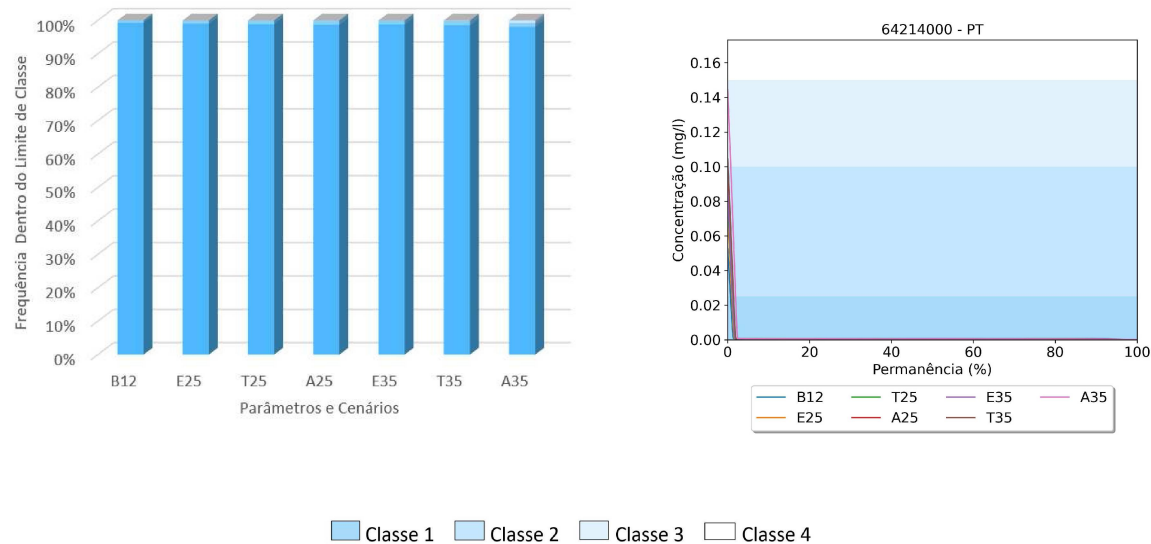
FONTE: O autor (2021).

Figura 84: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000.



FONTE: O autor (2021).

Figura 85: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000.

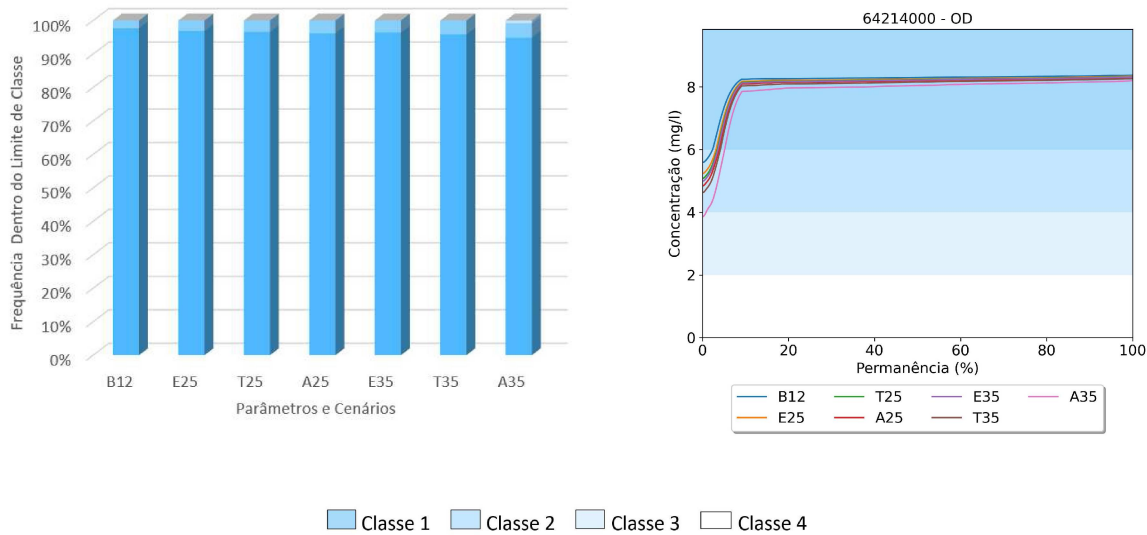


FONTE: O autor (2021).

O resultado das simulações de OD para a estação 64214000 (Figura 86) se destacam, pois o esperado era que as concentrações de oxigênio diminuíssem com o aumento das

cargas (Fernandes et al., 2020b), o que não se realizou, complementando o quadro de desafios envolvidos nas simulações de oxigênio e em sua calibração.

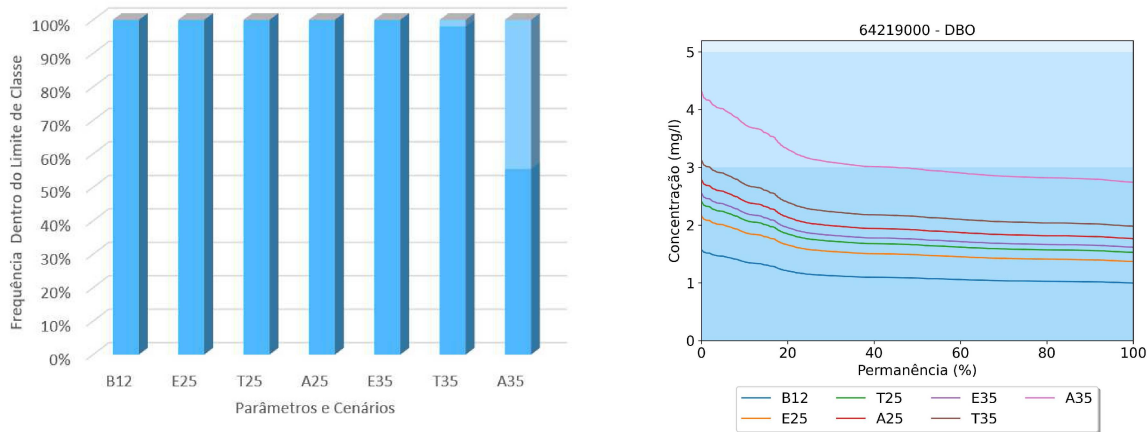
Figura 86: Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64214000.



FONTE: O autor (2021).

Os resultados das simulações de qualidade da água para a estação 6421900 são apresentados entre as figuras 87 e 89. O parâmetro mais bem calibrado no ponto foi NT, poluente cujo aumento no aporte de cargas pode ser absorvido pelo rio sem extrapolar os limites de classe 1 nos cenários futuros. A calibração de DBO e PT não foi considerada satisfatória e os resultados são inconclusivos.

Figura 87: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64219000.

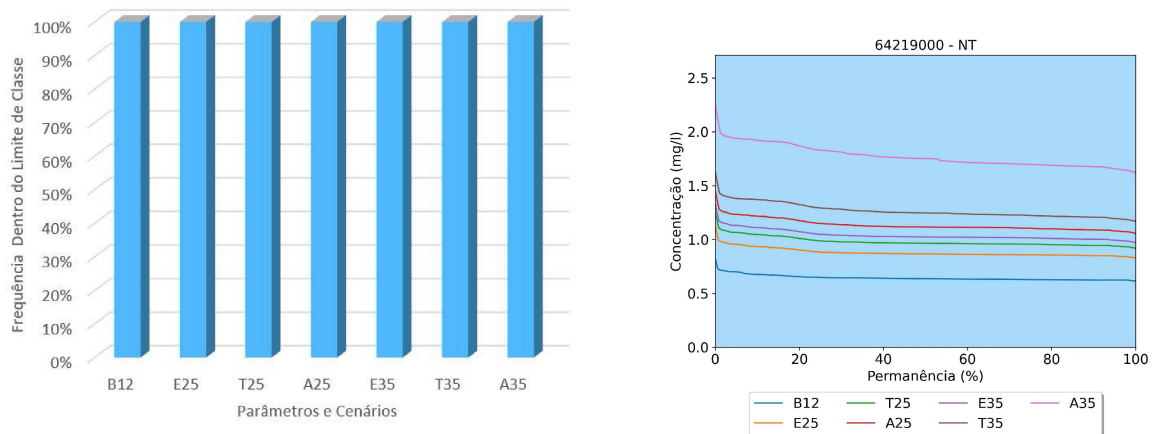




Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

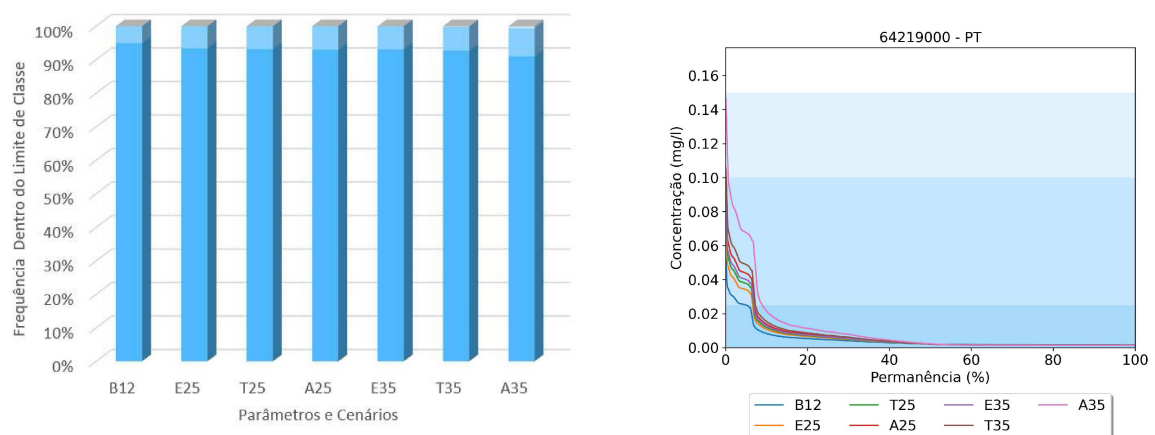
Figura 88: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64219000.



Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

Figura 89: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64219000.



Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

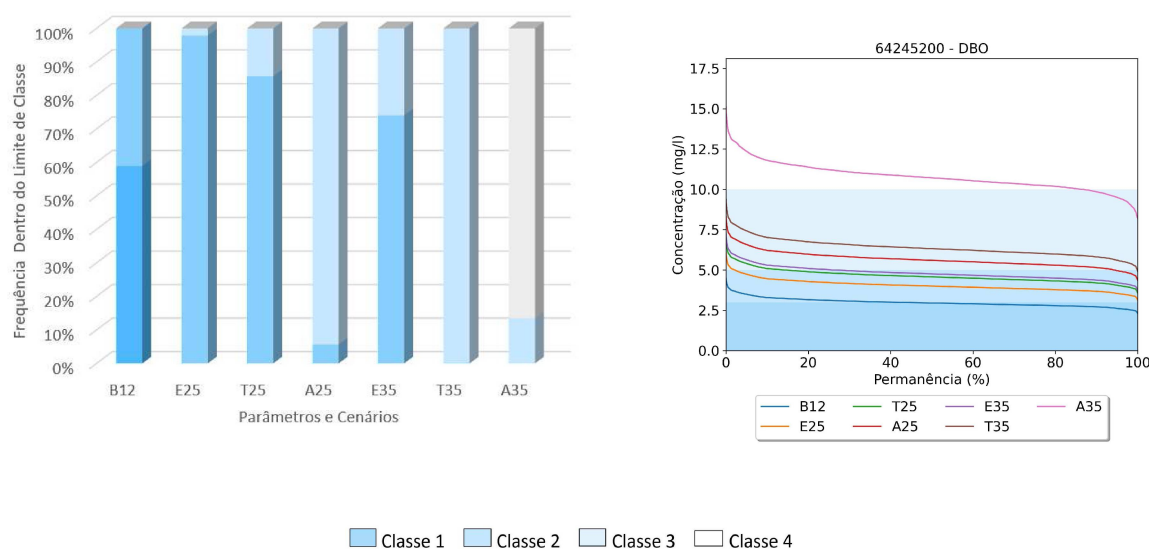
FONTE: O autor (2021).



O ponto da estação 64245200, com resultados apresentados entre as figuras 90 e 93, teve boa calibração para NT, e considerada razoável para DBO e PT, suas concentrações foram superestimadas no cenário base. As concentrações simuladas de OD no cenário base não foram capazes de replicar o comportamento observado.

Como as simulações de DBO no cenário B12 mostraram tendência superestimar as concentrações e o cenário A35 ficou pouco acima dos limites de classe 3, espera-se que a estação não tenha problemas em se manter dentro dos limites de classe 3 para o parâmetro DBO no futuro.

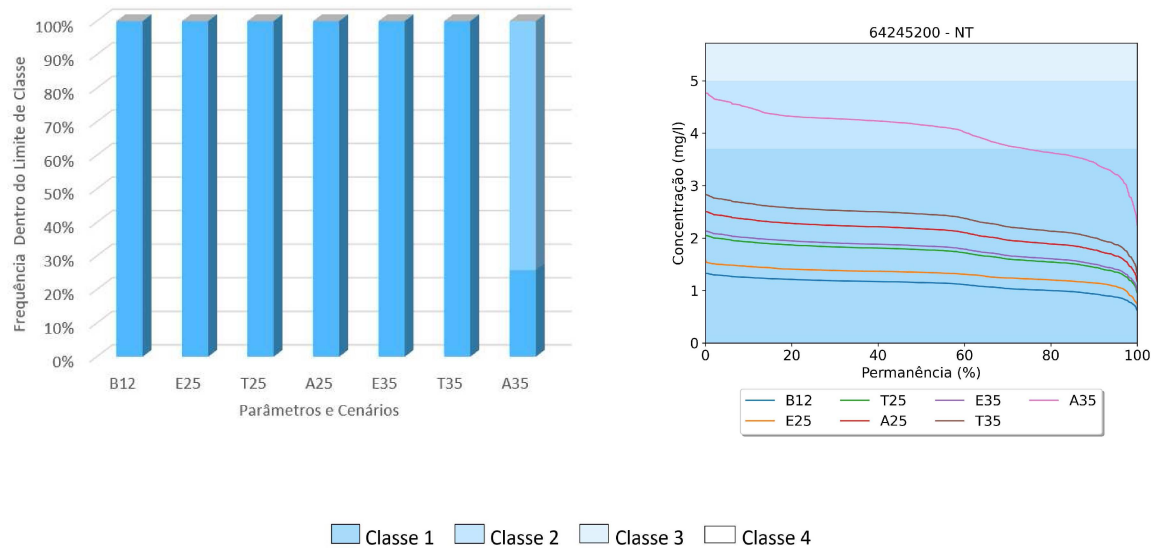
Figura 90: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200.



FONTE: O autor (2021).

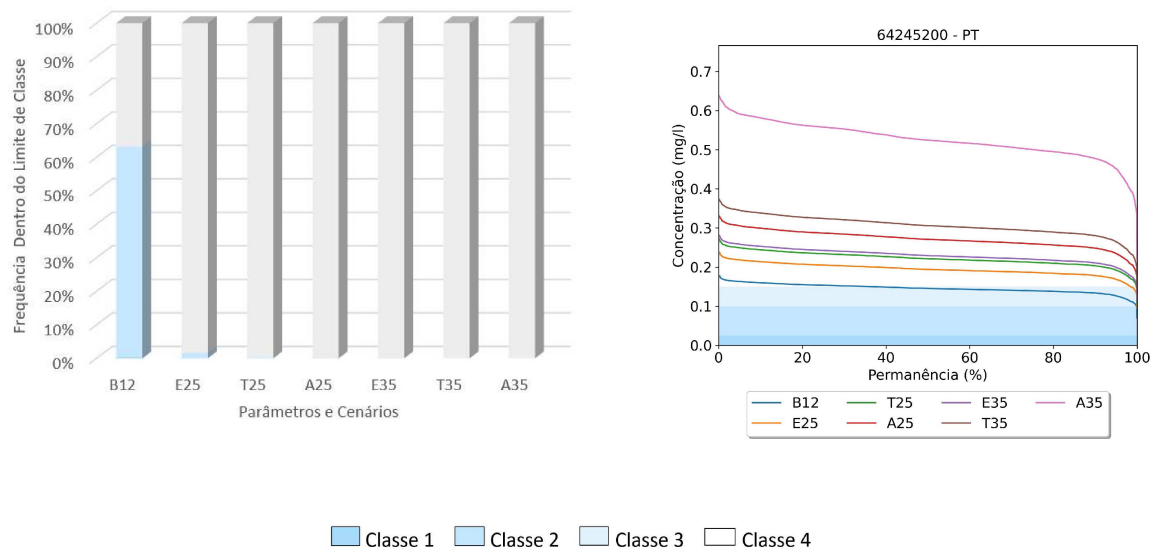
As simulações de NT (Figura 91) mostraram boa calibração e, mesmo com o aumento no aporte de cargas, indicam que o ponto se manteria dentro dos limites de classe 2 para o parâmetro.

Figura 91: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200.



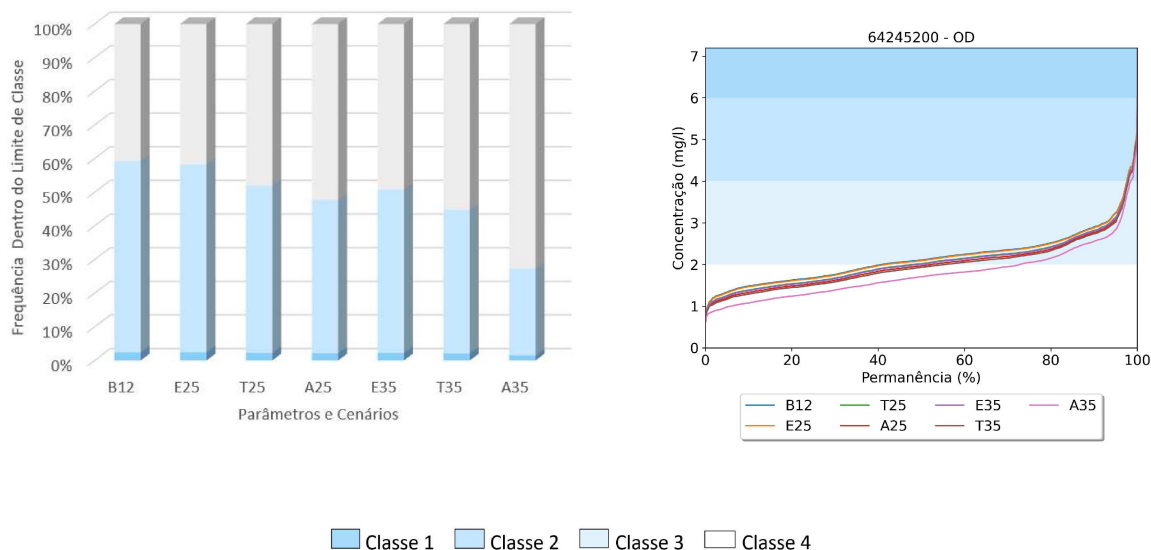
FONTE: O autor (2021).

Figura 92: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200.



FONTE: O autor (2021).

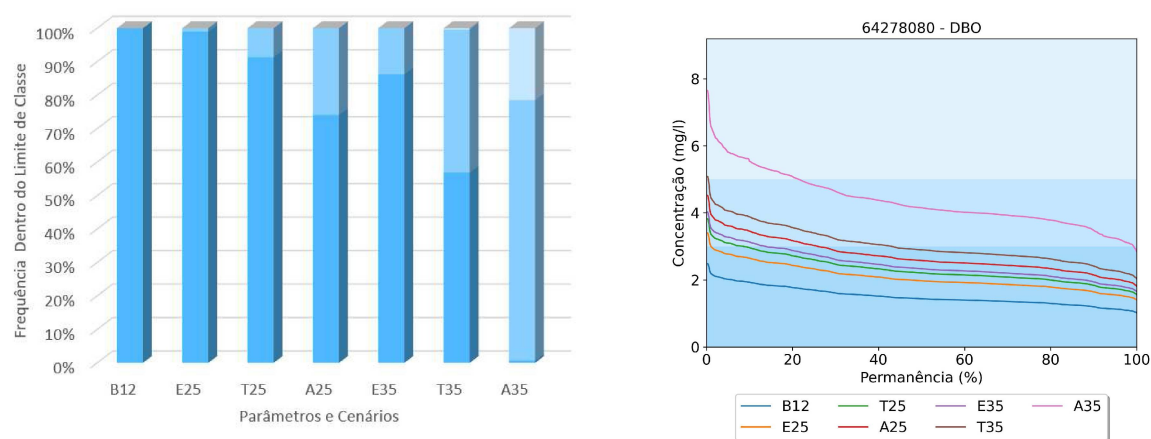
Figura 93: Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64245200.



FONTE: O autor (2021).

O ponto da estação 64578080 (Figuras 94 a 96) teve boa calibração para NT, parâmetro cujas simulações indicam que o aumento no aporte de cargas no trecho não deve comprometer a conformidade com os limites de classe 1. As simulações de DBO e PT não foram capazes de replicar o comportamento observado no cenário B12, e portanto são inconclusivas.

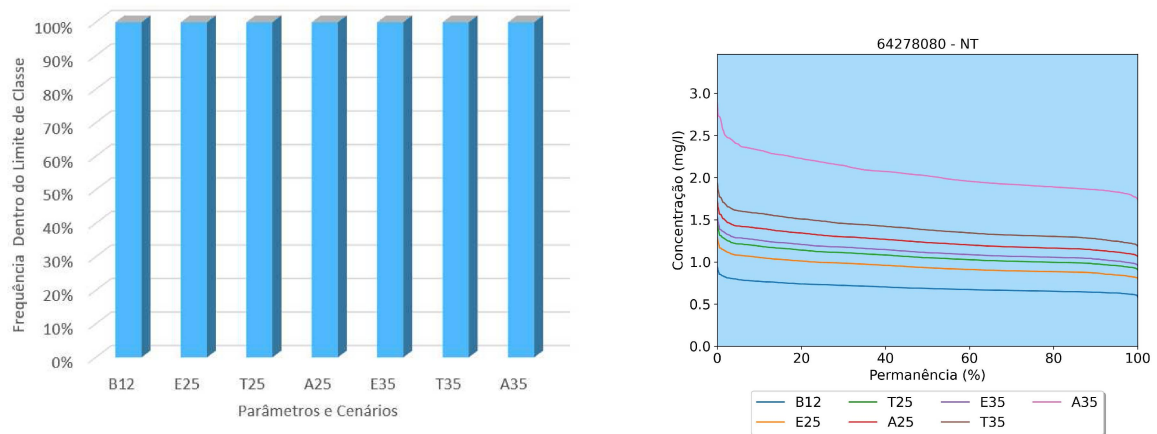
Figura 94: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64278080.



Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

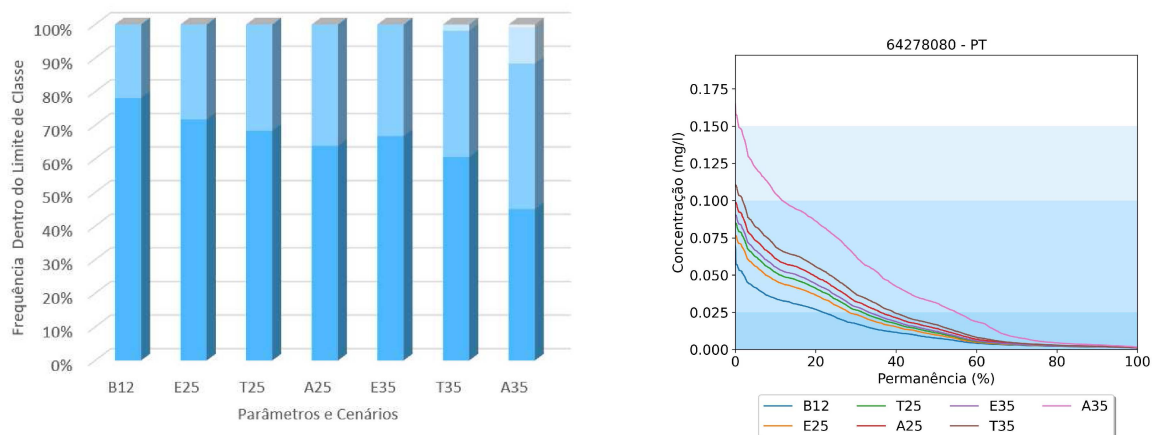
Figura 95: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64278080.



Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

Figura 96: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64278080.



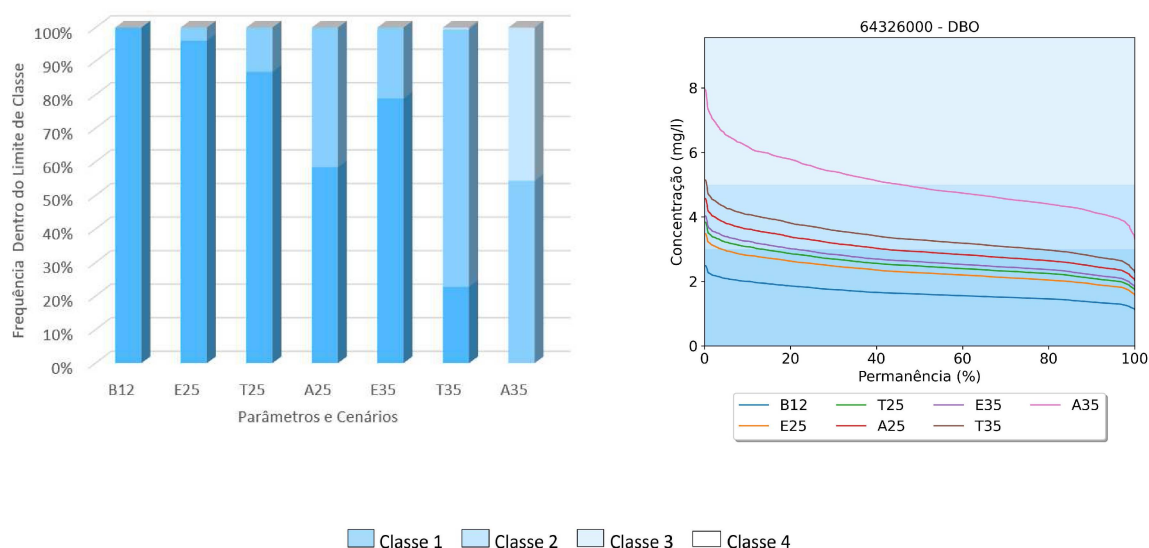
Classe 1 Classe 2 Classe 3 Classe 4

FONTE: O autor (2021).

O ponto da estação 64326000, com os resultados apresentados entre as figuras 97 e 100, é o que teve, na média, a melhor calibração entre os parâmetros, e portanto é a melhor base para avaliar o comportamento dos cenários futuros de aumento no aporte de cargas.

Para DBO, as simulações indicam que as concentrações não devem superar os limites de classe 2, menos para o cenário A35, onde o ponto deve passar cerca de 50% com concentrações acima do limite de classe 2.

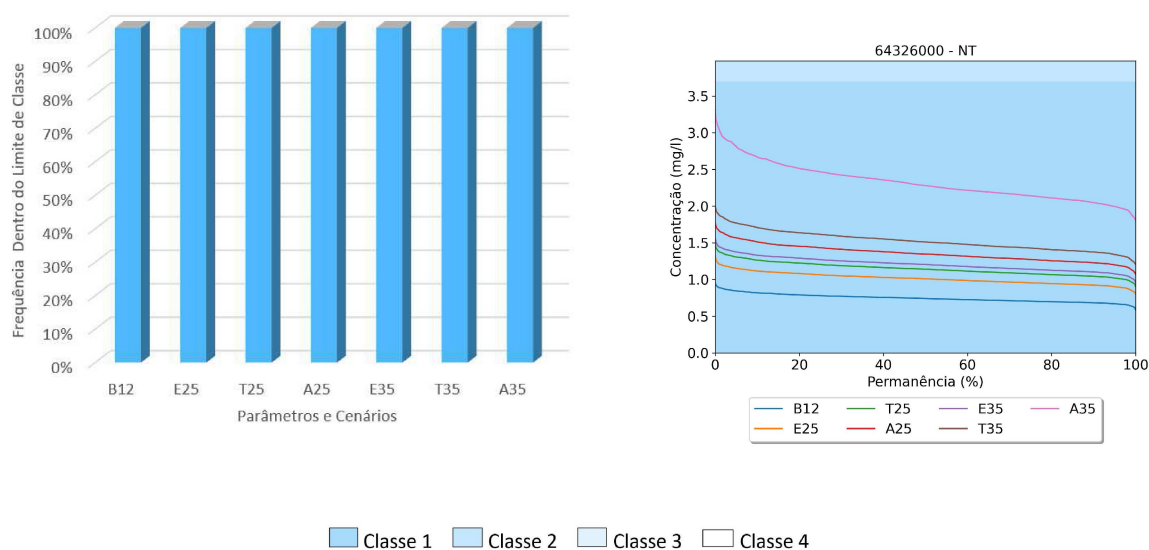
Figura 97: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000.



FONTE: O autor (2021).

As simulações de NT (Figura 98) indicam que o ponto não deve ter concentrações acima do limite de classe 1 no futuro para os cenários de aumento no aporte de cargas.

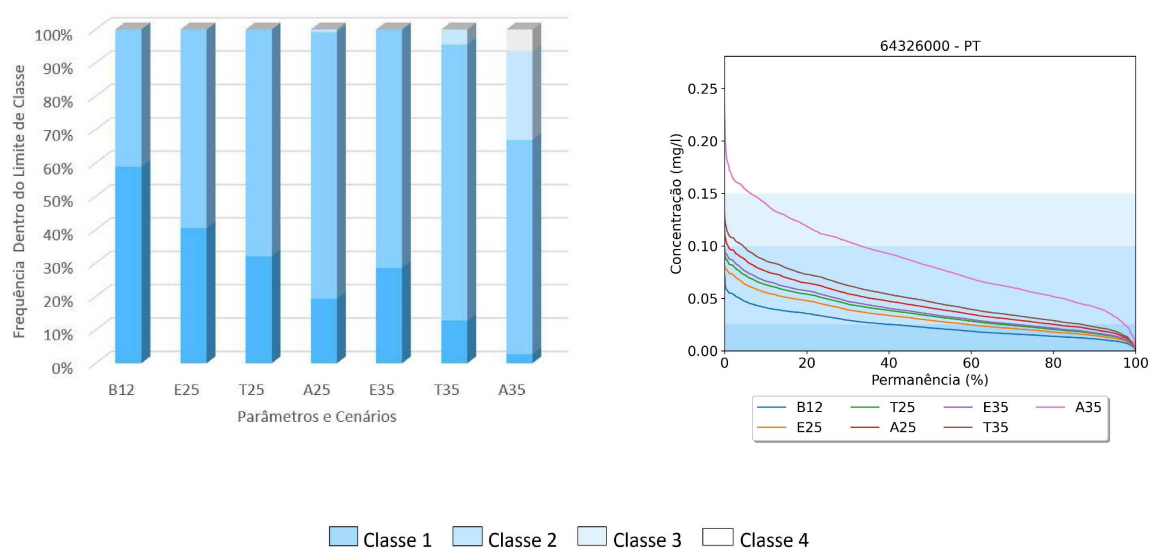
Figura 98: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000.



FONTE: O autor (2021).

Ao contrário das simulações de NT, as simulações de PT (Figura 99) indicam que as concentrações do poluente podem superar o limite estipulado pela classe 3 no cenário A35. Considerando que as concentrações simuladas no cenário B12 foram ligeiramente inferiores às observadas, esse parâmetro se mostra o mais crítico no ponto.

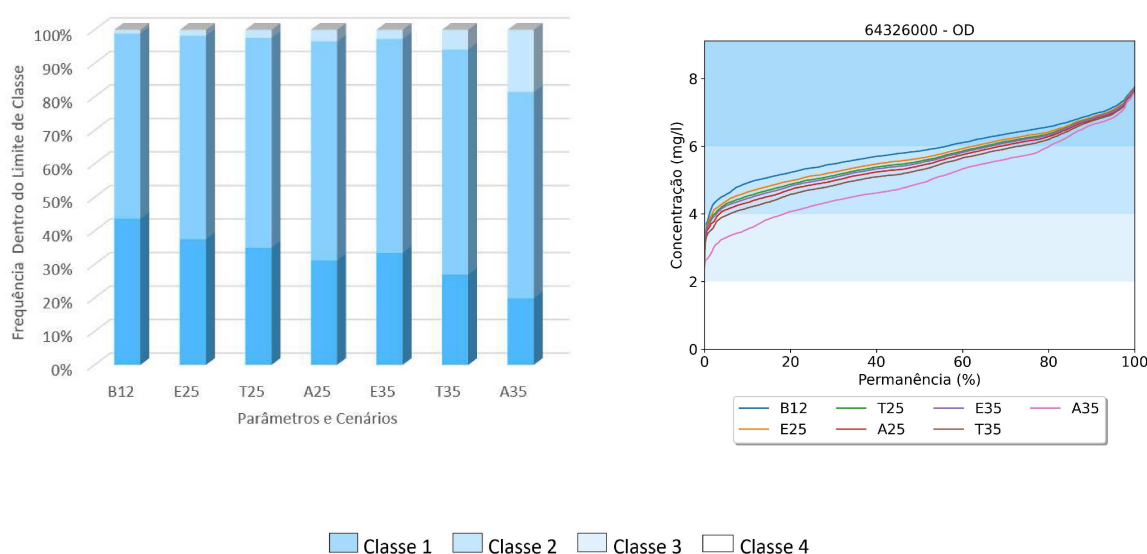
Figura 99: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000.



FONTE: O autor (2021).

As simulações de OD (Figura 100) tiveram concentrações ligeiramente subestimadas no cenário B12. Considerando que os cenários futuros indicam pouco tempo de permanência com concentrações abaixo do limite de classe 2, e apenas no cenário A35, OD não deve ser um parâmetro crítico para esse ponto no futuro.

Figura 100: Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64326000.



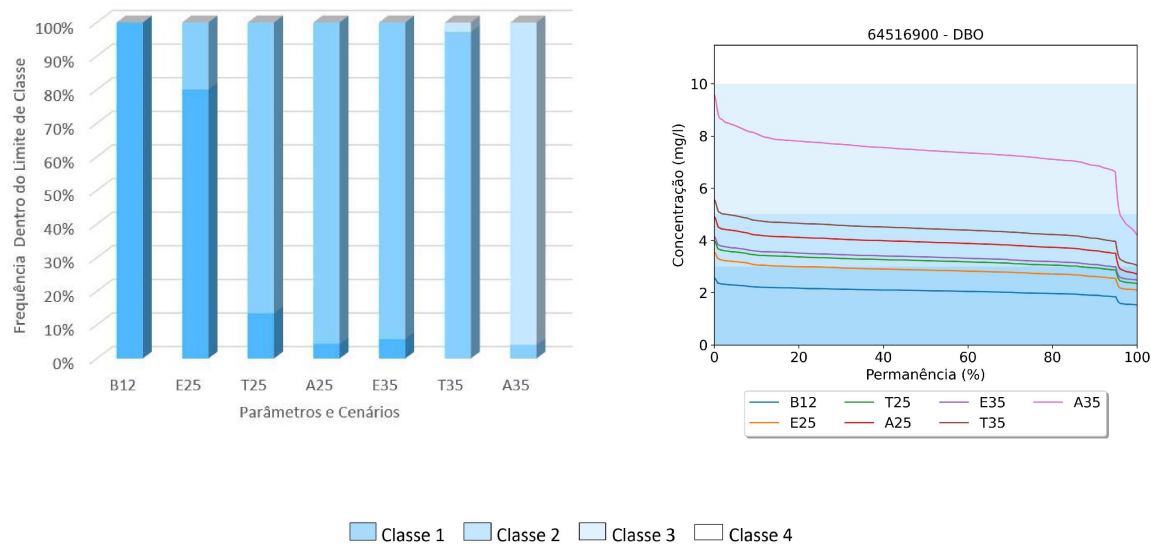
FONTE: O autor (2021).

A estação 64326000 foi tomada como a referência para a área de estudo, tanto pela sua posição, logo após a junção dos rios e do reservatório de Chavantes, quanto pelos bons resultados obtidos no cenário base. Os resultados posicionam a estação dentro dos limites de classe 1 em todos os cenários de NT, e dentro de classe 2 para maioria dos cenários de DBO e PT. Entretanto, deve-se destacar que DBO e PT tem cerca de 40% de frequência com concentrações mais altas que as limites para classe 2, no cenário A35.

A estação 64515900, cujos resultados são apresentados entre as figuras 101 e 104, teve calibração considerada boa para os parâmetros NT, DBO e OD, mas especialmente para DBO. Esse tende a se manter dentro dos limites de classe 2 para todos os cenário, menos o A35, onde a série de concentrações tem a maior parte dos valores dentro dos limites de classe 3.



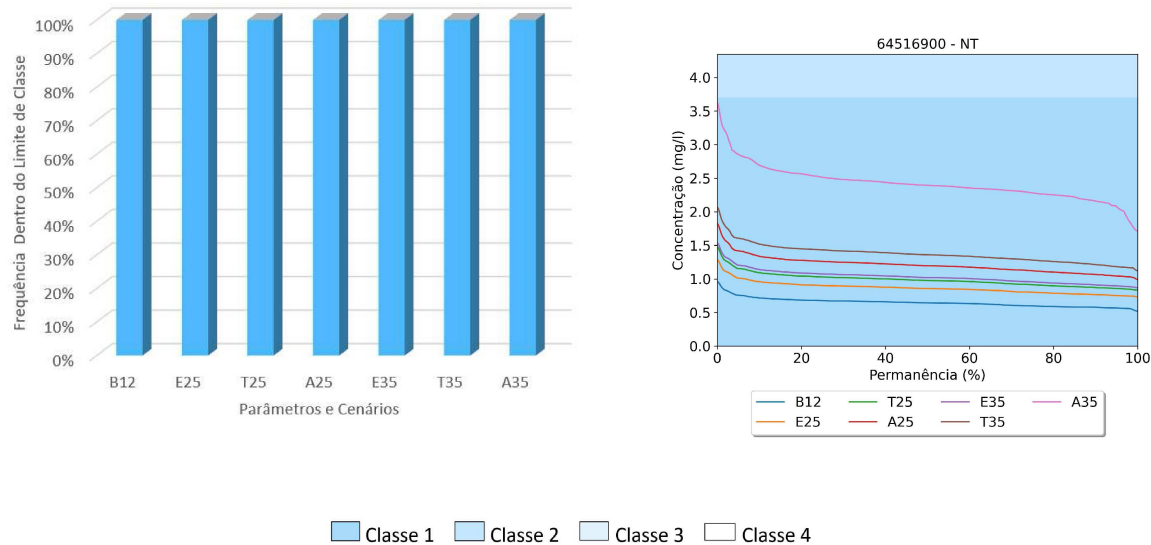
Figura 101: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900.



FONTE: O autor (2021).

As simulações de NT (Figura 102) para a estação 64516900 foram levemente subestimadas, mas considerando a conformidade com o limite de classe 1 para todos os cenários futuros, acredita-se que a estação não tenha problemas em se manter dentro dos limites de classe 2 no futuro.

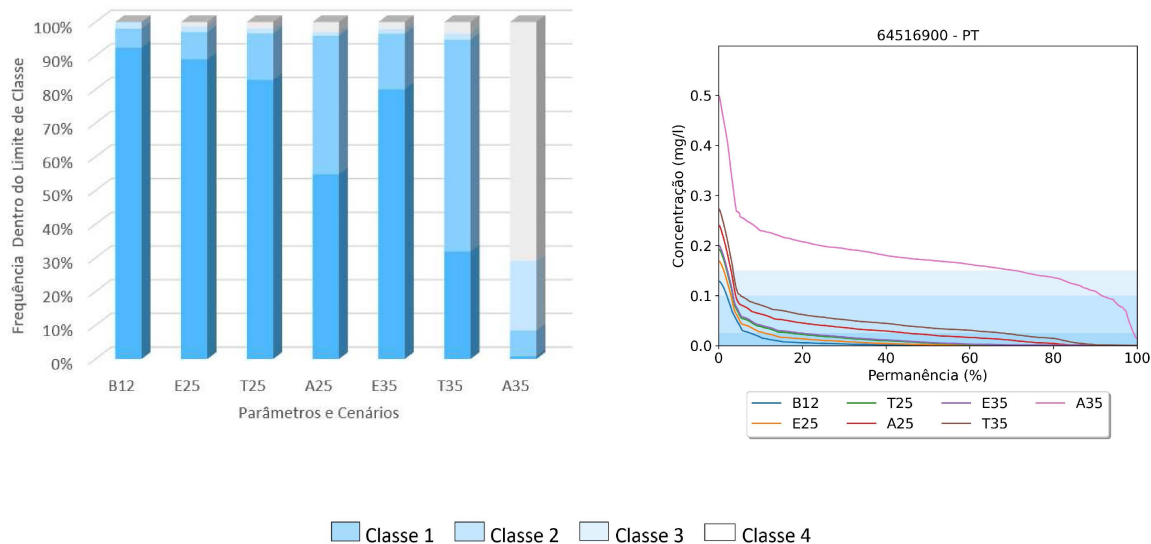
Figura 102: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900.



FONTE: O autor (2021).



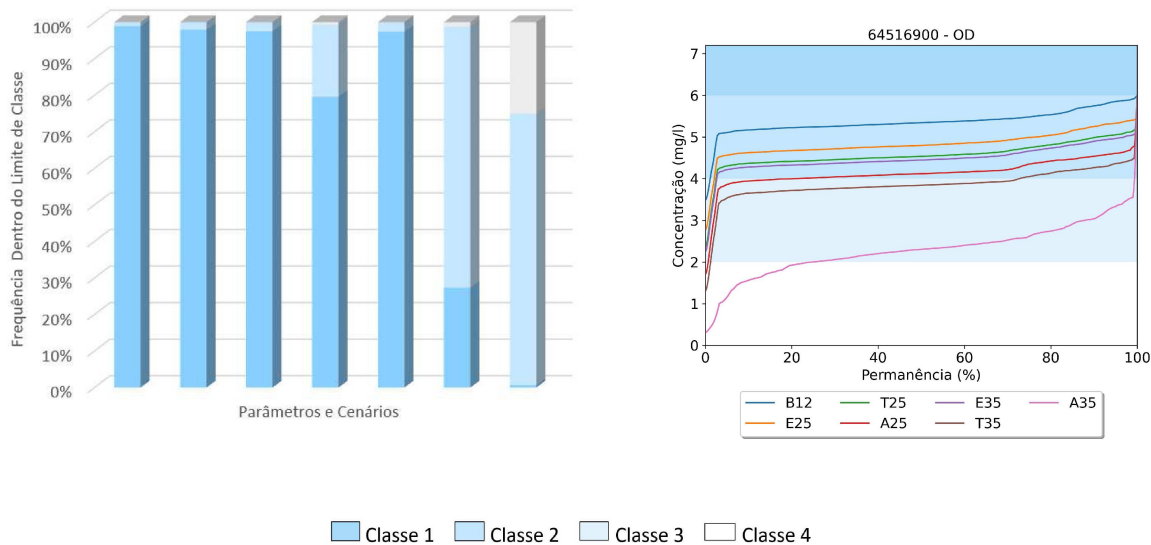
Figura 103: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900.



FONTE: O autor (2021).

Assim como para NT, as concentrações de OD (Figura 104) no ponto da estação 64516900 foram subestimadas. Considerando que até o cenário T35 as concentrações ficam próximas ou acima do limite de classe 2, acredita-se que o ponto deva se manter dentro do limite de classe 2 no futuro, com exceção do cenário A35.

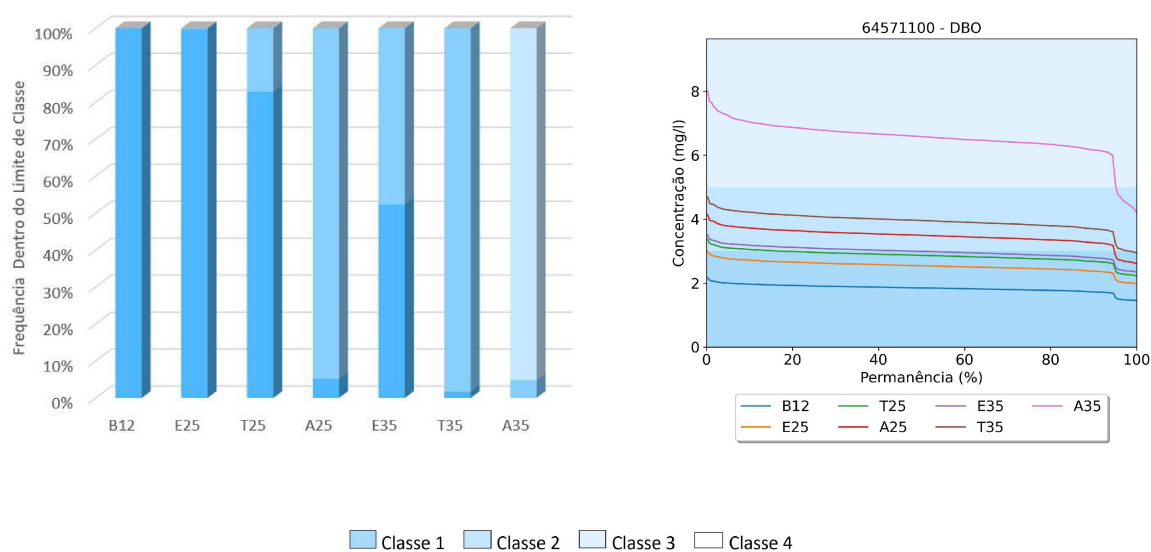
Figura 104: Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64516900.



FONTE: O autor (2021).

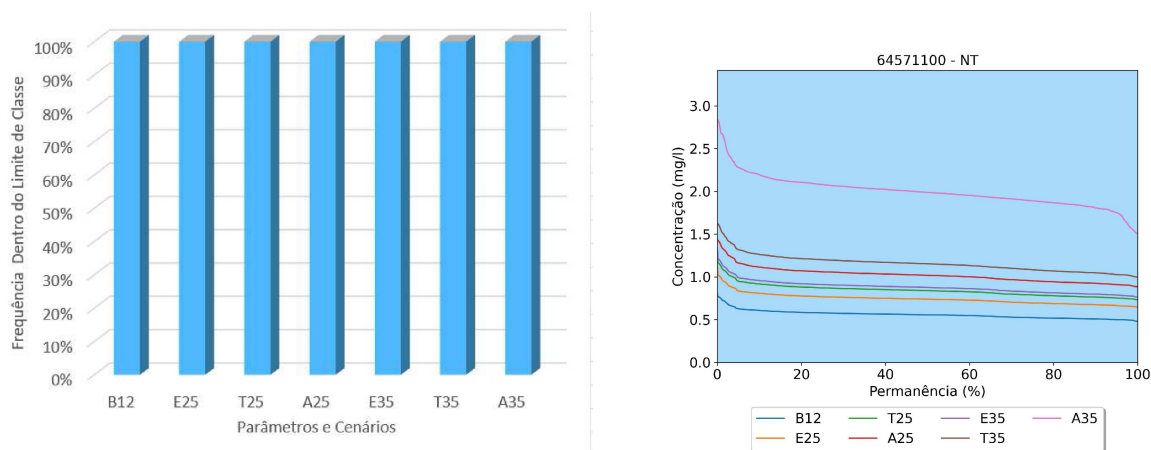
Os resultados das simulações para a estação 64571100, apresentados entre as figuras 105 e 108, tiveram boa calibração para DBO, mas subestimaram as concentrações de PT, NT e OD. Considerando o parâmetro DBO, as simulações indicam que o ponto deve se manter dentro dos limites de classe 2 no futuro, a menos que o cenário A35 se realize. Os resultados dos demais parâmetros não são conclusivos por conta da calibração.

Figura 105: Resultados das simulações de DBO para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100.



FONTE: O autor (2021).

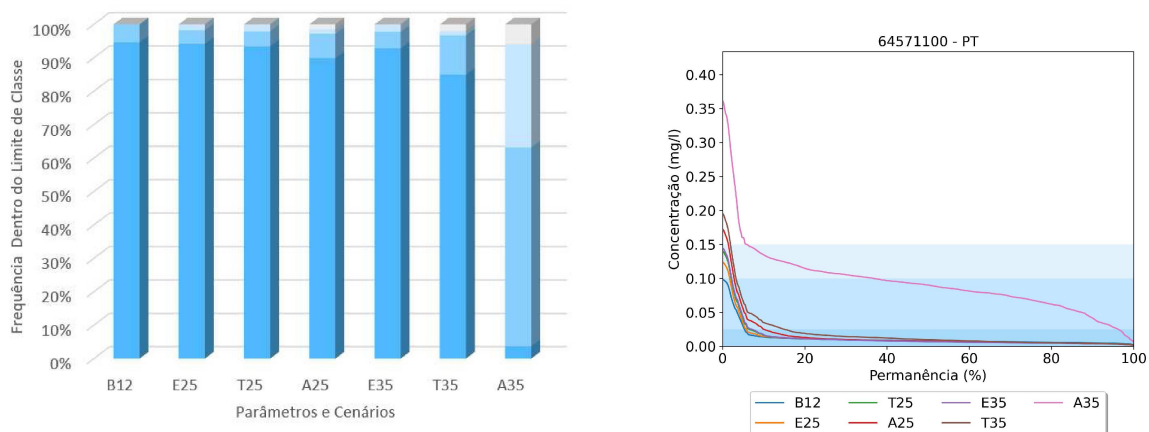
Figura 106: Resultados das simulações de NT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100.



Classe 1
  Classe 2
  Classe 3
  Classe 4

FONTE: O autor (2021).

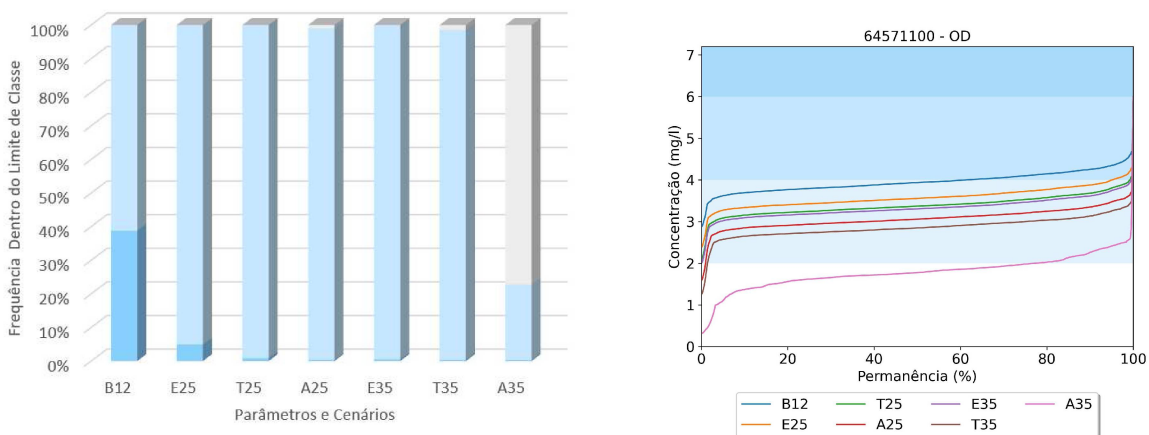
Figura 107: Resultados das simulações de PT para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100.



Classe 1
  Classe 2
  Classe 3
  Classe 4

FONTE: O autor (2021).

Figura 108: Resultados das simulações de OD para os cenários futuros de aumento nos aportes de cargas para a estação 64571100.



Classe 1
  Classe 2
  Classe 3
  Classe 4

FONTE: O autor (2021).

Os resultados apresentados para os cenários futuros permitem entender o impacto do aumento de aporte de cargas na conformidade com os limites de classe dos rios Paranapanema e Itararé. Essa avaliação fica mais clara quando aplicadas aos trechos das estações, como por exemplo a estação 64326000, representativa do trecho de rio entre os reservatórios de Chavantes e Capivara. Nesse caso da região logo após a junção dos rios Paranapanema e Itararé, o aumento nas concentrações de entrada dos poluentes reduziria a frequência com que esse atingiria os limites de classe 1, mas se mantendo dentro dos limites da classe 2 para DBO, NT e PT para mais de 95% do tempo para todos os cenários, menos A35, que sugere frequência de 46% do tempo em classe 3 para DBO.

Esses resultados podem ser usados para auxiliar os responsáveis por gerir a área, indicando quais parâmetros são mais críticos e sensíveis, assim como a forma que o desenvolvimento da bacia pode alterar em cenários futuros a conformidade com a classe estabelecida para o rio, permitindo quantificar as reduções de carga necessárias para atender as concentrações limite das classes. O modelo é estável numericamente, apto a calibração e de livre acesso, possibilitando a adaptação a outros cenários, mas destacando a limitação na calibração, que compromete em especial as simulações de PT e OD. Acredita-se que resultados mais representativos dos observados poderiam ser obtidos aplicando a simulação em trechos, contornando o problema da representatividade dos coeficientes cinéticos constantes, ou aplicando modelo que represente a variação espacial desses coeficientes.

## 5 Considerações finais

*Em algum lugar, algo incrível está esperando ser descoberto.*

Carl Sagan

*“São pequenas coisas que fazem a diferença. E fazem a diferença porque somos 8 bilhões. Se todos fizermos, já é muita coisa”*

Sônia Bridi

A garantia de disponibilidade hídrica em rios, em quantidade e qualidade suficiente para entender as demandas humanas atuais e futuras, é o desafio da gestão de recursos hídricos. A metodologia vigente que garante o atendimento desses objetivos tem bons resultados, mas também limitações. Ao mesmo tempo que a combinação de modelagem em regime permanente e o sistema de classes da CONAMA (2005) é robusto ao propor a classificação de vários tipos de corpos hídricos, não se considera variações temporais e nem define claramente situações atípicas. Bacias hidrográficas tem comportamento dinâmico e características individuais, que não necessariamente são representadas pelas classes. O estudo dessas variações temporais em rios é importante para avaliar justamente que tipo de informação adicional essa metodologia viabiliza, quando comparada com a tradicional, além dos desafios envolvidos em seu desenvolvimento. O enquadramento atual dos rios Paranapanema e Itararé tem a maior parte dos trechos em classe 2, mas com alguns em classe especial, 1 e 3 (ANA, 2016).

A modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água usando o HEC-RAS revelou desafios, em especial a representação da geometria dos reservatórios e aportes laterais de carga, além dos processos de transporte e transformação dos poluentes e sua calibração, além do acesso e processamento de dados. Considerando que a metodologia aplicada propõe avaliar o impacto de uma representação em uma geometria que integre trechos de rios e reservatórios, com coeficientes cinéticos constantes. As simulações se mostraram capazes de replicar parte condições de qualidade da água indicadas pelo monitoramento dos rios Paranapanema e Itararé nos últimos anos, especialmente para os parâmetros NT e DBO, especialmente a permanência nos limites de classe. Entretanto, as séries de

concentrações simuladas não foram uniformemente representativas das observadas, em especial para PT e OD, indicando que trabalhos futuros precisem de trechos de simulação menores, menos sensíveis a variação espacial dos coeficientes cinéticos, ou modelo que represente essa variação ao longo da geometria.

Estudos mostram que resultados mais próximos dos observados são possíveis integrando modelos de bacia ao HEC-RAS (Fleischmann et al., 2019), ou aplicando a calibração por trecho (Fernandes et al., 2020b). Fazendo a modelagem trecho a trecho e contornando as limitações da calibração, abre-se mão da modelagem integrada rio-reservatório proposta nesse trabalho. No que tange a aplicação em gestão de recursos hídricos, os resultados indicam a viabilidade do uso modelo HEC-RAS, mas atentando-se as limitação da calibração.

Os resultados obtidos comparando os cenários futuros, onde a transgressão dos limites de classe para determinado parâmetro pode ser quantificada temporalmente, exemplificam o contexto onde modelos em regime não-permanente podem se mostrar uma boa solução. É esperado que rio tenha cenários com concentrações mais altas, seja pelo aumento de aporte de cargas difusas ou por outra combinação qualquer de fatores, como descrito na resolução CONAMA (2005), mas cuja variabilidade temporal não é possível de ser avaliada com estudos baseados em vazões de referência ( $Q_{50}$ ,  $Q_7$ ,  $Q_{10}$ , etc.). A aplicação de modelos em regime não-permanente ou hidrológicos, por outro lado, permitem quantificar a frequência de tempo em que a concentração limite para determinado poluente é superada, cumprindo portanto seu papel como ferramenta adicional à gestão de recursos hídricos. Cabe então ao gestor avaliar em que quantidade do tempo é aceitável que as concentrações do rio sejam acima daquelas previstas por classe, e as políticas para garantir que esses objetivos sejam cumpridos.

A integração rio - reservatório proposta, estudando a variação de geometria e condições de contorno, conseguiu demonstrar o impacto do represamento em rios. Isso inclui tanto a transição de regime lótico para lântico, com a gradual redução de velocidades, quanto a diferença dos hidrogramas simulados e observado para as seções mais a jusante. Esses resultados também permitem avaliar o comportamento dos reservatórios, incluindo o efeito de acúmulo de nutrientes, para Chavantes e Capivara, e de redução nas concentrações de poluentes, no caso de Jurumirim, complementando os resultados obtidos por Cunha-Santino et al. (2017). Os resultados não puderam ser diretamente comparados

com pontos nos reservatórios do Rio Paranapanema, análise a ser feita em estudos futuros. Destaca-se também a metodologia usada para cálculo do tempo de residência, baseada nos resultados hidrodinâmicos no sentido longitudinal, permitindo delimitar os trechos de rio, reservatório e transição.

O desenvolvimento dessas simulações e análise dos seus resultados incitam alguns questionamentos, que criam expectativas animadoras para estudos futuros. Ressalta-se os desafios em representar o comportamento de qualidade da água em um trecho tão longo, limitado pelos coeficientes cinéticos constantes no modelo HEC-RAS, e recomenda-se uso de trechos menores. Separar a simulação em trechos é um processo mais dispendioso, mas que pode ser simplificado ao se acoplar com algum programa que faça a conexão entre os trechos simulados. Existem estudos que automatizam o HEC-RAS usando Python e MATLAB (Dysarz, 2018; Leon and Goodell, 2016), mostrando que tal aplicação é possível. Outro ponto de destaque é a integração com modelos de bacia, usando ferramentas como o HEC-HMS. Tal abordagem traz uma camada a mais de informações, além de outro modelo, com seus próprios desafios, características e erros, mas que pode ser interessante por aproximar as relações de chuva - vazão e emissão de cargas difusas, permitindo considerar a variação temporal do aporte de cargas no rio.

## 6 Referências

- Adams, T., Chen, S., Davis, R., Schade, T., and Lee, D. (2010). **The Ohio river community HEC-RAS model**. *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2010*, pages 1512–1523.
- Adams, T., Chen, S., and Heim, J. (2011). **NWS/OHRFC operational experience with the Ohio River community HEC-RAS model**. *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability - Proceedings of the 2011 World Environmental and Water Resources Congress*, 41173(May 2011):2244–2252.
- Ahmed, H., Tanaka, N., and Tamai, N. (2009). **Distributed Water Balance Model in Watershed Coupling with River Dynamic flow Routing Method**. pages 12–17.
- ANA (2016). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema**.
- ANA (2019a). **Hidroweb**.
- ANA (2019b). **Inventário ANA**.
- Becker, C. A. C. and Ferreira, A. H. R. (2020). **The challenges of modeling rivers and reservoirs**.
- Brasil (1997). **Lei N° 9.433 / 1997 - Política Nacional de Recursos Hídricos**. Technical report.
- Brunner, G. W. and CEIWR-HEC (2016). **HEC-RAS River Analysis System User’s Manual**. US Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center. (January):1–790.
- Cabral, S. L., Campos, J. N. B., Silveira, C. d. S., and Teixeira, F. A. d. A. (2016). **Integração do sig, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: Aplicação à bacia do rio granjeiro-ce**. *Geociencias*, 35(1):90–101.



- Castagnoli, J. P. (2007). *Uma Implementação Numérica Do Acoplamento Água Superficial: Água Subterrânea*. PhD thesis, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, Brazil.
- Chapra, S. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*, volume 1. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1 edition.
- Che, D. and Mays, L. W. (2017). Application of an Optimization/Simulation Model for Real-Time Flood-Control Operation of River-Reservoirs Systems. *Water Resources Management*, 31(7):2285–2297.
- Chen, X., Xu, B., Zheng, Y., and Zhang, C. (2019). Nexus of water, energy and ecosystems in the upper Mekong River: A system analysis of phosphorus transport through cascade reservoirs. *Science of the Total Environment*, 671:1179–1191.
- Chung, S. W., Ko, I. H., and Kim, Y. K. (2008). Effect of reservoir flushing on downstream river water quality. *Journal of Environmental Management*.
- CONAMA (2005). Resolução Conama Nº 357, De 17 De Março De 2005. Technical report, Brasília.
- Correia, R. (2018). *UTILIZAÇÃO DE DADOS TOPO-BATIMÉTRICOS PARA A MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D COM APOIO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – ESTUDO DE CASO DO RIO PARAGUAI*. PhD thesis, UFPR.
- Cunha-Santino, M. B., Fushita, Â. T., and Bianchini, I. (2017). A modeling approach for a cascade of reservoirs in the Juquiá-Guaçu River (Atlantic Forest, Brazil). *Ecological Modelling*, 356:48–58.
- da Silva, A. C. C., Fantin-Cruz, I., de Lima, Z. M., and de Figueiredo, D. M. (2019). Cumulative changes in water quality caused by six cascading hydroelectric dams on the Jauru river, tributary of the pantanal floodplain. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24:1–12.
- Dysarz, T. (2018). Application of python scripting techniques for control and automation of HEC-RAS simulations. *Water (Switzerland)*, 10(10).

Esteves, F. A. (1987). *Fundamentos de Limnnologia*. 3 edition.

Fan, C., Ko, C. H., and Wang, W. S. (2009). **An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation.** *Journal of Environmental Management*, 90(5):1824–1832.

Fernandes, C. V. S., Bleninger, T., Kishi, R. T., de Paula, E. V., dos Santos, I., and Garcia, J. I. B. (2019a). **Nota Técnica 1 - Relatório Consolidade de Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade das Águas Superficiais em Rios de Domínio da União e seus Reservatórios na UGRH Paranapanema.** Technical report, UFPR, Curitiba.

Fernandes, C. V. S., Bleninger, T., Kishi, R. T., de Paula, E. V., dos Santos, I., and Garcia, J. I. B. (2019b). **Nota Técnica 2 - Relatório Consolidade de Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade das Águas Superficiais em Rios de Domínio da União e seus Reservatórios na UGRH Paranapanema.** Technical report, UFPR, Curitiba.

Fernandes, C. V. S., Bleninger, T., Kishi, R. T., de Paula, E. V., dos Santos, I., and Garcia, J. I. B. (2020a). **Nota Técnica 3 - Relatório Consolidade de Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade das Águas Superficiais em Rios de Domínio da União e seus Reservatórios na UGRH Paranapanema.** Technical report, UFPR, Curitiba.

Fernandes, C. V. S., Bleninger, T., Kishi, R. T., de Paula, E. V., dos Santos, I., and Garcia, J. I. B. (2020b). **Nota Técnica 4 - Relatório Consolidade de Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade das Águas Superficiais em Rios de Domínio da União e seus Reservatórios na UGRH Paranapanema.** Technical report, UFPR, Curitiba.

Fernandes, C. V. S., Bleninger, T., Kishi, R. T., de Paula, E. V., dos Santos, I., and Garcia, J. I. B. (2020c). **Nota Técnica 5 - Relatório Consolidade de Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade das Águas Superficiais em Rios de Domínio da União e seus Reservatórios na UGRH Paranapanema.** Technical report, UFPR, Curitiba.

- Ferreira, A. H. R., Fernande, C. V. S., and Ferreira, D. M. (2020a). **Avaliando o Impacto da Escassez Hídrica na Qualidade de Água em Rios e Reservatórios Usando Modelo Não Permanente.** In *III Simpósio PPGERHA*. III Simpósio PPGERHA.
- Ferreira, A. H. R., Ferreira, D. M., and Fernandes, C. V. S. (2019). **O Impacto da Contribuição Lateral em Simulações Hidrodinâmicas - um Estudo de Caso no Rio Paranapanema.** In *II Simpósio PPGERHA*, page 2, Curitiba. II Simpósio PPGERHA.
- Ferreira, D., Muhlenhoff, A., and Fernandes, C. (2018). **Modelos de poluição difusa: desafios, estratégias e impacto para a gestão de recursos hídricos.** *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 15(1):10–10.
- Ferreira, D. M., Ferdandes, C. V. S., and Kaviski, E. (2015). ***Simulação Hidrodinâmica E De Qualidade Da Água Em Rios: Impacto Para Os Instrumentos De Gestão De Recursos Hídricos.*** PhD thesis.
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., and Gomes, J. (2017). **Verification of Saint-Venant equations solution based on the lax diffusive method for flow routing in natural channels.** *Rbrh*, 22(0).
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., and Kaviski, E. (2016). **Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente.** *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, 21(3):479–492.
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., Kaviski, E., and Fontane, D. (2020b). **Transformation rates of pollutants in rivers for water quality modelling under unsteady state: A calibration method.** *Journal of Hydrology*, 585(February):124769.
- Fleischmann, A., Paiva, R., and Collischonn, W. (2019). **Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison.** *Journal of Hydrology X*, 3:100027.
- GIA (2013). **Estudos Para A Definição Dos Parques Aquícolas Nos Reservatórios**

- Do Paranapanema. Volume 2: Parâmetros Abióticos E Modelagem.** Technical report, MINISTÉRIO DA PESCA E AQUICULTURA.
- Gichamo, T. Z., Popescu, I., Jonoski, A., and Solomatine, D. (2012). **River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling.** *Environmental Modelling and Software*, 31:37–46.
- Jeppson, R. (2010). ***Open channel flow: Numerical methods and computer applications.*** Routledge, 1 edition.
- Kane, S., Sambou, S., Leye, I., Diedhiou, R., Tamba, S., Cisse, M. T., Ndione, D. M., and Sane, M. L. (2017). **Modeling of Unsteady Flow through Junction in Rectangular Channels: Impact of Model Junction in the Downstream Channel Hydrograph.** *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 06(03):304–319.
- Knapik, H. G. (2014). **Organic Matter Characterization and Modeling in Polluted Rivers for Water Quality Planning and Management.**
- Kozak, C. (2016). ***Water Quality Assessment And Its Effects On Diffuse Pollution Considering A New Water Quality And Quantity Approach.*** Dissertação, UFPR.
- Krylova, A., Antipova, E., Center, D. P. B. N. C., and 2017, U. (2017). **The derivation of the Saint–Venant equations.** *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Numerical modelling in atmosphere, ocean, and environment studies.*, 16:21–35.
- Leon, A. S. and Goodell, C. (2016). **Controlling HEC-RAS using MATLAB.** *Environmental Modelling and Software*, 84:339–348.
- Liggett, J. A. and Cunge, J. A. (1975). ***Basic equations of unsteady flow.*** Ft. Collins, CO, vol. 1, ca edition.
- LOBEIRO, A. M. (2012). ***Solução das equações de Saint Venant em uma e duas dimensões usando o método das características.*** Tese, UFPR.
- Long, L., Ji, D., Liu, D., Yang, Z., and Lorke, A. (2019). **Effect of cascading reservoirs on the flow variation and thermal regime in the lower reaches of the Jinsha River.** *Water (Switzerland)*, 11(5).

- Luo, Z., Shao, Q., Zuo, Q., and Cui, Y. (2020). **Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin.** *Journal of Hydrology*.
- Mannina, G. and Viviani, G. (2010). **A hydrodynamic water quality model for propagation of pollutants in rivers.** *Water Science and Technology*, 62(2):288–299.
- Md Ali, A., Di Baldassarre, G., and Solomatine, D. P. (2015). **Test de différents espacements entre sections en travers en modelisation hydraulique 1D : étude de cas sur la rivière Johor, en Malaisie.** *Hydrological Sciences Journal*, 60(2):351–360.
- Morales-Marín, L. A., Wheeler, H. S., and Lindenschmidt, K. E. (2017). **Assessment of nutrient loadings of a large multipurpose prairie reservoir.** *Journal of Hydrology*, 550:166–185.
- Moura, A., Severiano, J., Tavares, N., and Dantas, E. (2013). **The role of a cascade of reservoirs and seasonal variation in the phytoplankton structure in a tropical river.** *Brazilian Journal of Biology*, 73(2):291–298.
- Paiva, R. C., Collischonn, W., and Tucci, C. E. (2011). **Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach.** *Journal of Hydrology*, 406(3-4):170–181.
- Passaia, O., Siqueira, V. A., Brêda, J. P., Fleischmann, A. S., and de Paiva, R. C. D. (2020). **Impact of large reservoirs on simulated discharges of Brazilian rivers.** *Brazilian Journal of Water Resources*, (Imd):1–9.
- Pinto, G. L. and de Souza, W. L. (2019). **Integração Entre Sig, Hec-ras E Hec-hms Para Modelagem Da Bacia Hidrográfica Do Rio Barigui.** Tcc, UFPR.
- Poff, N. L. R., Olden, J. D., Merritt, D. M., and Pepin, D. M. (2007). **Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications.** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(14):5732–5737.
- Pontes, P. R. M. (2016). **Modelagem Hidrológica E Hidrodinâmica Integrada Da Bacia Do Rio Da Prata.** PhD thesis, UFRGS.

- Pramanik, N., Panda, R. K., and Sen, D. (2010). **One dimensional hydrodynamic modeling of river flow using DEM extracted river cross-sections.** *Water Resources Management*, 24(5):835–852.
- Santos, A. B. I., de Freitas Terra, B., and Araújo, F. G. (2010). **Influence of the river flow on the structure of fish assemblage along the longitudinal gradient from river to reservoir.** *Zoologia*, 27(5):732–740.
- Scharffenberg, W. (2016). **Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual.** *U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center*, 1(Agosto):598.
- Schindfessel, L., Creëlle, S., and De Mulder, T. (2015). **Flow patterns in an open channel confluence with increasingly dominant tributary inflow.** *Water (Switzerland)*, 7(9):4724–4751.
- Steinstrasser, C. E. (2005). **Método difusivo de Lax aplicado na solução das equações de Saint Venant.** PhD thesis, UFPR.
- Tercini, J. R. B. and Mélo Júnior, A. V. (2016). **Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(2):338–346.
- Tranmer, A. W., Weigel, D., Marti, C. L., Vidergar, D., Benjankar, R., Tonina, D., Goodwin, P., and Imberger, J. (2020). **Coupled reservoir-river systems: Lessons from an integrated aquatic ecosystem assessment.**
- USACE (2016). **HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0.** Number February.
- Vijay, R., Gupta, R., and Dash, S. (2017). **Modelling approach for water quality assessment of Pili River using HEC-RAS.** *Journal of Indian Water Works Association*, (July 2018):8.
- Wang, H., Lei, X., Yan, D., Wang, X., Wu, S., Yin, Z., and Wan, W. (2018). **An Ecologically Oriented Operation Strategy for a Multi-Reservoir System: A Case Study of the Middle and Lower Han River Basin, China.**

Wang, Y., Zhang, W., Zhao, Y., Peng, H., and Shi, Y. (2016). **Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River.** *Journal of Hydrology*, 541:1348–1362.

White, F. M. (2011). ***Fluid mechanics.*** McGraw-Hill.

Zhang, Z. and Wu, M. (2013). **Evaluating the Transport and Fate of Nutrients in Large Scale River Basins Using an Integrated Modeling System.** *Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture*, pages 187–204.

# A Tabela de Revisão Bibliográfica

Características Modelagem																							
No.	Autores	Título	Ano	Tipo Publicação	Mêso	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Black AR, Rowan JS, Duck RW, Bragg OM et al.	DIRHAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive	2005	Artigo	Revista	Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems	EU	Aplicar o DIRHAM para avaliação de impacto em rios a partir das diretrizes europeias (EC WFD)	-	S	-	DIRHAM	N	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-
2	Thomas G. Huntington	Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis	2006	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	Global	Estudar padrões históricos no comportamento hidrológico de corpos hídricos	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Mark Jensen	Overview of Model Output for Unsteady Flow	2003	Manual	-	-	Global	Usa a saída da modelagem via Hec Ras de fluxos não permanentes	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
4	EU	COUNCIL DIRECTIVE 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption	1998	Lei	-	Official Journal of the European Communities	Global	Define as características da água a ser usada para consumo humano	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
5	EU	DIRECTIVE 2000/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy	2000	Lei	-	Official Journal of the European Communities	Global	Define algumas condições para preservação da qualidade de água na EU	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Eleftheria Kampa, Wenke Hansen	Heavily Modified Water Bodies	2004	Livro	-	-	EU	Via aplicar as resoluções da EU (WFD 2000/60/EC) para definir um rio altamente modificado. Método HWMB	-	N	-	HWMB	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Paulo Rôgenes Monteiro Pontes	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA INTEGRADA DA BACIA DO RIO DA PRATA	2016	Tese	-	UFRGS	Brasil - Bacia do Rio da Prata	Modelo integrado (hidrológico e hidrodinâmico) na bacia do Rio da Prata	3	S	-	MGB	S	S	N	N	1.000.000	2400	-	-	-	-	-
8	Rui P. dos Santos, Duke-energy, Wagner V. F., Ferreira et al.	Modelação da Propagação de Cheias Causadas por Rompimento de Barragens na Cadeia de Geração do Rio Paranaíba	2003	Artigo	Congresso	QITENEL	Paranaíba	Aplicaram as equações de Saint Venant para simular operação e cumprimento de barragem em sistema em cascata no Paranaíba	2	S	Saint-Venant	-	N	S	N	N	-	-	-	-	-	-	Vazão, nível
9	Cristovao Fernandes and Bryan Kamey	NUMERICAL SOLUTION OF THE ADVECTION DISPERSION-REACTION EQUATION UNDER TRANSIENT HYDRAULIC CONDITIONS	2001	Artigo	Congresso	29th IAHR	Global	Aplicam método de diferenças finitas para solução da equação de advecção-dispersão-reação em fluxo transitente	5	ADR	-	-	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-
10	David Bispo Ferreira, Ana Paula Muhlenhoff, Crisovão Vicente Scapulatempo Fernandes	Modelo para Controle da poluição Difusa: Desafios, Estratégias e Impacto para a Gestão de Recursos Hídricos	2018	Artigo	Revista	REGA	Global	Compara a funcionalidade de diferentes modelos hidrológicos e sua implementação na gestão de recursos hídricos	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-

Características Modelagem																							
No.	Autores	Título	Ano	Tipo Publicação	Mêso	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Black AR, Rowan JS, Duck RW, Bragg OM et al.	DIRHAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive	2005	Artigo	Revista	Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems	EU	Aplicar o DIRHAM para avaliação de impacto em rios a partir das diretrizes europeias (EC WFD)	-	S	-	DIRHAM	N	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-
2	Thomas G. Huntington	Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis	2006	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	Global	Estudar padrões históricos no comportamento hidrológico de corpos hídricos	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Mark Jensen	Overview of Model Output for Unsteady Flow	2003	Manual	-	-	Global	Usa a saída da modelagem via Hec Ras de fluxos não permanentes	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
4	EU	COUNCIL DIRECTIVE 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption	1998	Lei	-	Official Journal of the European Communities	Global	Define as características da água a ser usada para consumo humano	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
5	EU	DIRECTIVE 2000/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy	2000	Lei	-	Official Journal of the European Communities	Global	Define algumas condições para preservação da qualidade de água na EU	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Eleftheria Kampa, Wenke Hansen	Heavily Modified Water Bodies	2004	Livro	-	-	EU	Via aplicar as resoluções da EU (WFD 2000/60/EC) para definir um rio altamente modificado. Método HWMB	-	N	-	HWMB	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Paulo Rôgenes Monteiro Pontes	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA INTEGRADA DA BACIA DO RIO DA PRATA	2016	Tese	-	UFRGS	Brasil - Bacia do Rio da Prata	Modelo integrado (hidrológico e hidrodinâmico) na bacia do Rio da Prata	3	S	-	MGB	S	S	N	N	1.000.000	2400	-	-	-	-	-
8	Rui P. dos Santos, Duke-energy, Wagner V. F., Ferreira et al.	Modelação da Propagação de Cheias Causadas por Rompimento de Barragens na Cadeia de Geração do Rio Paranaíba	2003	Artigo	Congresso	QITENEL	Paranaíba	Aplicaram as equações de Saint Venant para simular operação e cumprimento de barragem em sistema em cascata no Paranaíba	2	S	Saint-Venant	-	N	S	N	N	-	-	-	-	-	-	-
9	Cristovao Fernandes and Bryan Kamey	NUMERICAL SOLUTION OF THE ADVECTION DISPERSION-REACTION EQUATION UNDER TRANSIENT HYDRAULIC CONDITIONS	2001	Artigo	Congresso	29th IAHR	Global	Aplicam método de diferenças finitas para solução da equação de advecção-dispersão-reação em fluxo transitente	5	ADR	-	-	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-
10	David Bispo Ferreira, Ana Paula Muhlenhoff, Crisovão Vicente Scapulatempo Fernandes	Modelo para Controle da poluição Difusa: Desafios, Estratégias e Impacto para a Gestão de Recursos Hídricos	2018	Artigo	Revista	REGA	Global	Compara a funcionalidade de diferentes modelos hidrológicos e sua implementação na gestão de recursos hídricos	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-



		Detalhes Modelagem																							
No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
11	2	Australia	Australian Drinking Water Guidelines 6 2011	2013	Lei	-	-	Austrália	Define as características da água a ser usada para consumo humano na Austrália	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	4	Paulo Sérgio Pereira, Bruno Victor Veiga, Maurício Dzedzi	Avaliação da Influência do fósforo e do Nitrogênio no Processo de Eutrofização de Grandes Reservatórios Estudo de Caso: Usina Hidrelétrica Foz do Arica	2013	Artigo	Revista	SBRH	Brasil - Hidrelétrica Foz do Arica	Avalia a influência do fósforo e nitrogênio no processo de eutrofização do reservatório e qualidade da água	S	Balanco de Massa	FLUX, Bathub	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	3	Eloy et al	Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Iguaçu entre Salto Osório e Salto Caxias	-	Artigo	-	-	Entre salto osório e salto caxias	Descreve a modelagem no trecho	3	S	Chuva- vazão, Saint-Venant	S	S	N	-	-	-	-	-	-	-	26 estações pluviométricas, oito fluviométricas	-	
14	3	Jussara Cabral Cruz, Carlos Eduardo Morelli Tucci	Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência	2008	Artigo	Revista	SBRH	Brasil - Rio Grande do Sul	Compara o tipo de dados -ano a ano e série toda - e seus resultados com sua aplicabilidade na implantação de recursos de gestão	S	Análise estatística	-	-	N	S	N	-	-	-	-	-	-	13 estações fluviométricas	-	
15	4	David A Chin	Water-quality Engineering in Natural Systems	2006	Livro	-	-	Geral	Livro sobre processos em ambientes aquáticos	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	1	Camila A Bittencourt	INTEGRAÇÃO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA E GEOPROCESSAMENTO APLICADO PARA ESTUDOS DE ENQUADRAMENTO DE CORPOS D'ÁGUA	2018	Dissertação	-	PPGERHA	Brasil - Bacia do Alto Iguaçu	Estuda o uso de ACP para determinar quais parâmetros interferem mais no enquadramento. Geoprocessamento usado mais para organização	S	Estatística	-	-	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	4	Daniele M. Ferreira	SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS IMPACTO	2015	Dissertação	-	PPGERHA	Geral	Desenvolve modelo hidrodinâmica e de qualidade da água para avaliar as vantagens de sua utilização sobre a modelagem permanente/enquadramento tradicional	S	-	SIHQAL	N	S	S	N	3000	90	Hidrogramas	500	50	5 estações fluviométricas	Nível, vazão, DBO, OD		
18	6	USACE	Hydraulic Reference Manual	2016	Manual	-	-	EUA	Referencial teórico do HEC-RAS	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	3	Ven te Chow	Open-channel Hydraulics	1988	Livro	-	-	Geral	Guia para simulação de canais abertos	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	3	Tery W Sturm	Open-channel Hydraulics	2001	Livro	-	-	Geral	Guia para simulação de canais abertos	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	
21	3	L.M. Marangon Lima, E. Popovaa, P. Damienb	Modeling and forecasting of Brazilian reservoir inflows via dynamic linear models	2014	Artigo	Revista	International Journal of Forecasting	Brasil	Modelagem hidrológica para as bacias brasileiras usando modelo bayesiano	S	Eqs. Dinâmicas lineares (estatística), modelo autoregressivo	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	Hidrograma de entrada	
22	3	Rodrigo C.D. Paiva, Walter Collischonn, Carlos E.M. Tucci	Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach	2011	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	Brasil - Bacia do Rio Purus (Amazônia)	Propõe modelo hidrológico/hidrodinâmico para modelagem de bacia com escassez de dados	4	S	Saint-Venant	GIS	S	S	N	N	370000	11000	-	-	-	-	-	
23	1	CONAMA	357	2005	Lei	-	-	Brasil	Estipula as Classes para enquadramento	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	4	Daniele M. Ferreira	INTEGRATED ANALYSIS FOR MODELING OF FLOW AND TRANSPORT OF CONTAMINANTS IN RIVERS	2019	Tese	-	PPGERHA	Brasil	Desenvolve o SIHQAL	S	-	SIHQAL	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	4	MATHEUS YAGO ANTUNES LUCKNER	TCC ANÁLISE DA VARIAÇÃO TEMPORAL DO IQAR UTILIZANDO MODELO CE-QUAL-W2 PROPOSTA DE UM INDICADOR COM BAIXA RESOLUÇÃO TEMPORAL	2018	TCC	-	PPGERHA	Brasil - Reservatório do Vossoroca	Modela reservatório considerando certa variação temporal	S	-	CE-QUAL-W2	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	4	Ana Carolina Canossa Becker	ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS E AVALIAÇÃO DA REPRESENTATIVIDADE DO IQAR ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO VOSSOROCA, PR	2018	TCC	-	PPGERHA	Brasil - Reservatório do Vossoroca	Compara a variação da qualidade da água (por profundidade e sazonalidade) com sua representatividade no IQAR	S	-	-	-	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-

No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem														
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
27	3	Karina Thomé Ramalho ; Candice Schaufert Garcia; Laertes Munhoz da Cunha; Guilherme Rocha Peplau & Wesley Leonel de Souza	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA BASE TOPOGRÁFICA NA PROPAGAÇÃO DA CHEIA INDUZIDA PELA RUPTURA DE BARRAGENS	2013	Artigo	-	Congresso ABRH	UHE Sobradinho	Modela o abastecimento de área após comprimento de barragem usando HEC-RAS	-	S	-	HEC-RAS	N	S	-	3600	256	hidrograma a montante e curva de descarga a jusante	-	-	-	-	-
28	6	USACE	Users Manual	2016	Manual	-	-	EUVA	Manual do usuário do HEC-RAS	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	1	ANA	Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Parapananema	2016	Relatório	-	-	Brasil - Bacia do Parapananema	Estudo de Enquadramento da Bacia	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	4	David R Boyd	Water we Drink	2006	Relatório	-	-	Canadá	Discute tópicos gerais de qualidade da água para consumo humano	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	6	Leon, Arturo S., Goodell, Christopher	Controlling HEC-RAS using MATLAB	2016	Manual	-	Environmental Modelling and Software	Geral	Propõe códigos para automatização do Hec Ras usando Matlab	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	3	Wang, Baiwei; Tian, Fujiang; Hu, Heping	Analysis of the effect of regional lateral inflow on the flood peak of the Three Gorges Reservoir	2011	Artigo	Revista	Science China Technological Sciences	Bacia de Três Gargantas	Estudar o impacto da contribuição lateral na simulação hidrodinâmica	3	S	-	-	N	S	N	-	56000	658	Hidrograma a montante e curva de descarga a jusante, distribuição lateral como condição interna	-	-	-	-
33	3	Che, Daniel; Mays, Larry W	Development of an Optimization/Simulation Model for Real-Time Flood-Control Operation of River Reservoirs Systems	2015	Artigo	Revista	Water Resources Management	Fantasia	Simula uma área fictícia em regime não permanente, usa matlab para integrar hidrológico e hidrodinâmico	3	S	-	HEC-RAS, HEC-HMS	S	S	N	-	56	2.5	-	-	-	-	-
34	3	Wei-Bo Chen 1 and Wen- Cheng Liu 2	Modeling the Influence of River Cross-Section Data on a River Stage Using a Two-Dimensional/ Three-Dimensional Hydrodynamic Model	2017	Artigo	Revista	Water 2017	Taiwan	Impacto da mudança de forma da seção transversal na simulação, simulações em 2D e 3D	-	S	-	-	N	S	N	-	1177	-	Hidrograma a montante e nível a jusante	-	-	-	-
35	4	Yongguli Wang, Wanshun Zhang, Yanxin Zhao, Hong Peng, Yingyuan Shi	Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River	2016	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	China - Rio Hanjiang	Modelagem de reservatórios em cascata (CRS) associando quantidade com a qualidade.	2	S	-	Saint- Venant, ADR	N	S	S	-	63800	400	-	-	-	15 seções	Vazão, Nível, PI
36	3	Renata Corrêa	UTILIZAÇÃO DE DADOS TOPO- BATIMÉTRICOS PARA A MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D COM APOIO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – ESTUDO DE CASO DO RIO PARAGUAI	2018	Dissertação	-	PPGERHA	Rio Paraguai	Uso de SIG para estimativa de seção transversal e simulação	-	S	-	SIG, HEC- RAS	N	S	N	-	362000	1270	Vazão a montante e nível a jusante	-	-	-	-
37	3	Christopher R. Goodell,	Dam Break Modeling for Tandem Reservoirs-a Case Study using HEC- RAS and HEC-HMS	2005	Livro	-	Special Collection on Advances in Hydraulic Structures Engineering	Oregon	Simula o impacto de rompimento de barragem na próxima em sequência, numa bacia pequena	-	S	-	HEC-RAS, HEC-HMS	S	S	N	-	0.52	0.62	-	-	-	-	-
38	3	Thomas Adams, Sherry Chen, Raymond Davis, Trent Schade, Deborah Lee	The Ohio River Community HEC- RAS model	2010	Artigo	Congresso	Congresso - World Environmental and Water Resources	Ohio	Grande cooperação para modelagem de rio, aparenta estar em estágio embrionário	4	S	-	HEC-RAS	N	S	N	-	-	2080	-	-	-	-	-
39	3	Luay Kadhim Hameed, Salah Tawfeek Ali	Estimating of Manning's Roughness Coefficient for Hilla River through Calibration Using HEC-RAS Model	2013	Artigo	Revista	Jordan Journal of Civil Engineering	Jordania - Rio Hilla	Investiga instabilidades no HEC-RAS na solução não-permanente em rios regulados	-	S	-	HEC-RAS	N	S	N	-	-	29	Vazão a montante e nível a jusante	-	-	-	-
40	3	Jennifer Kay Sharkey	Investigating instabilities with HEC- RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages	2014	Livro	-	-	Geral	Investiga instabilidades no HEC-RAS na solução não-permanente em rios regulados	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	3	Prabeer Kumar Parhi	HEC-RAS Model for Manning's Roughness: A Case Study	2012	Artigo	-	Open Journal of Modern Hydrology	Índia - Rio Mahanadi	Interessante por citar Nash and Sutcliffe	-	S	-	HEC-RAS	N	S	N	-	132.1	106	Hidrograma a montante e jusante	-	-	-	-

No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem														
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
42	3	Hao Wang, Xiaohui Lei, Denghua Yan, Xu Wang, Shuyue Wu, Zhengjie Yin, Wenhua Wan	An Ecologically Oriented Operation Strategy for a Multi-Reservoir System: A Case Study of the Middle and Lower Han River Basin, China _ Elsevier Enhanced Reader	2018	Artigo	Revista	Research Watershed Ecology	China - Rio Han	Estuda o impacto do represamento em série, e formas de operar de forma a minimizar impactos. 16 reservatórios. Foco muito maior na parte de operação que modelagem	-	2	S	-	N	S	N	-	159000	1577	-	-	-	-	-
43	3	Daniel Che, Larry W. Mays	Application of an Optimization Simulation Model for Real-Time Flood-Control Operation of River-Reservoirs Systems	2017	Artigo	Revista	Water Resources Management	Estados Unidos - Rio Cumberland	Usaram Hec Hms e Ras para modelar sistema rio reservatório em regime não permanente, visando controle de cheia, com foco em eventos extremos	-	2	S	-	HEC-HMS, HEC-RAS	S	S	N	-	28.16	-	-	-	-	-
44	3	Xinyu Wan, Lijuan Hua, Shuhan Yang, Hoshin V. Gupta, Ping'an Zhong	Evaluating the Impacts of a Large-Scale Multi-Reservoir System on Flooding Case of the Hual River in China	2018	Artigo	Revista	Water Resources Management	China - Rio Hual	Estuda o impacto da operação de reservatórios nos hidrogramas de rio a jusante. 20 reservatórios em sequência	-	2	S	-	-	-	-	-	10.5000	-	-	-	-	-	-
45	6	Tomasz Dysarz	Application of Python Scripting Techniques for Control and Automation of HEC-RAS Simulations	2018	Artigo	Revista	Water	Geral	Propõe códigos para automatização do Hec Ras usando Python	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	3	Gustavo Lima Pinto, Wesley Leonel De Souza	INTEGRAÇÃO ENTRE SIG, HEC-RAS E HEC-HMS PARA MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BARIGUI	2019	TCC		UFPR	Brasil - Rio Barigui	Propõe modelo hidrológico/hidrodinâmico para contornar situações com falta de dados. Compara hidrogramas	-	S	-	HEC-HMS, HEC-RAS	S	S	N	-	279	67	Hidrograma a montante e jusante	-	-	-	-
47	4	Danieli Mara Ferreira, Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes e Eloy Kaviski	Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente	2016	Artigo	Revista	RBRH	Brasil - Rio Iguaçu	Propõe uma análise em regime não permanente de rios, usando curvas de permanência ao invés de valores médios	-	S	-	SIQUAL	N	S	S	-	3.000	90	-	-	-	-	-
48	3	Christopher Goodell, Brian Wahlén	Dynamic and Level Pool Reservoir Drawdown-A Breach Modeling Practical Comparison for Dam	2009	Artigo	Congresso	33rd IAHR Congress		Propõe uma modelagem hidrodinâmica simplificada para reservatórios (dynamic routing vs level pool)	-	S	Saint-Venant	HEC-RAS, HEC-HMS	S	S	N	-	-	-	-	-	-	Situação hipotética	Nível
49	3	Saidou Kane, Soussou Sambou, Issa Leye, Raymond Diehrou, Seni Tambo, Mouhamed Talia Cisse, Didier Maria Ndione, Mousse Landing Sane	Modeling of Unsteady Flow through Junction in Rectangular Channels: Impact of Model Junction in the Downstream Channel Hydrograph	2017	Artigo	Revista	Computational Water, Energy, and Environmental Engineering		Estuda as formas de modelagem de uma junção no HEC-RAS através de análise de sensibilidade de massa e energia ou massa e momentum. EWS (energia) superestima os picos e acerta no volume, enquanto EBM (momentum) chega bastante perto	-	S	Saint-Venant	HEC-RAS	N	S	N	-	-	-	Hidrograma a montante, altura normal a jusante	-	-	Situação hipotética	Nível
50	4	Chihhao Fan, Chun-Han Ko, Wei-Shen Wang	An innovative modeling approach using QUAL2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation	2008	Artigo	Revista	Journal of Environmental Management	Taiwan - Rio Keelung	Faz modelagem integrada em HEC-RAS, para a parte hidrodinâmica e determinação da taxa de reaeração, com a qualidade de água por QUAL2K, Streeter-Phelps. Conclui que a simulação hidrodinâmica melhora a qualidade das simulações de qualidade da água	-	S	Energia (permanente e)	HEC-RAS, QUAL2K, Streeter-Phelps	N	S	S	N	501	80	profundidade média da mãe a jusante	-	-	-	Nível, DBO, NH3-N, PT e DOS (demanda de oxigênio do sedimento)
51	6	ANA	Manual básico HEC-RAS 5.0.3 - ruptura de barragem	2018	Manual	-	-	Geral	Manual de uso do HEC-RAS para ruptura de barragens, publicado pela ANA	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	4	L. Cimarelli, L. Cozzolino, A. D'Aniello, F. Morlando, D. Pianese, V.P. Singh	A new semi-Lagrangian routing procedure for constituent transport in steady and unsteady flow velocity	2016	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	Reino Unido, Nova Zelândia (validação)	Modela transporte de sedimentos e qualidade da água (OD e DBO) no HEC-RAS, de form separada (advecção - dispersão), aplicando em dois casos reais	-	S	Saint-Venant, ADE	HEC-RAS	N	S	S	N	-	-	-	-	-	-	DBO, OD, Nível

No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem														
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
53	3	João Paulo Lyra Fialho Brêda, Juan Martín Bravo and Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Efficient number of calibrated cross sections bottom levels on a hydrodynamic model using the SCE-UA algorithm. Case study: Madeira River	2017	Artigo	Revista	RBRH	Brasil - Rio Madeira	Estuda a calibração de simulação hidrodinâmica pela seção transversal	SCE-UA, Saint-Venant simplificada "Inertial model"	5			N	S	N	-	1100	Hidrograma a montante, cotograma a jusante	-	5			Nível
54	4	Antônio Carlos Coelho da Silva, Ibrahim Fantin-Cruz, Zorady Marques de Lima, Daniela Maimoni de Figueiredo	Cumulative changes in water quality caused by six cascading hydroelectric dams on the Jauru River, tributary of the Pantanal floodplain	2019	Artigo	Revista	RBRH	Brasil - Rio Jauru	Estuda os efeitos de seis reservatórios em cascata na bacia do Rio Paraguai. Resultados indicam variação no gradiente longitudinal e importância da modelagem integrada de bacia/entre reservatórios	Distribuição estatística	2	N		N	S	N	362259	412	-				23 anos de dados	Temperatura, pH, cor, turbidez, condutividade elétrica, DCO, DBO, OD, PT, NT, sólidos suspensos e sólidos totais
55	3	Lianghong Long, Daobin Ji, Deli Liu, Zhengjian Yang, Andreas Lorke	Effect of Cascading Reservoirs on the Flow Variation and Thermal Regime in the Lower Reaches of the Jinsha River	2019	Artigo	Revista	Water	China - Rio Jinsha	Modela dois reservatórios em sequência e seus impactos no hidrograma e temperatura mais a jusante. Conclui que o efeito em cascata dos reservatórios não é de grande relevância. As alterações no hidrograma a jusante se relacionam com o tamanho dos reservatórios	CE-QUAL-W2	2	S		N	S	N	-	235	-				15 anos de qualidade, 20 de vazão/nível	Nível, temperatura
56	5	Wenqing Shi, Qiwen Chen, Qitao Yi, Juhua Yu, Yuyu Ji, Luming Hu, Yuchen Chen	Carbon Emission from Cascade Reservoirs: Spatial Heterogeneity and Mechanisms	2017	Artigo	Revista	Environmental Science & Technology	China - Rio Mekong	Usaram dados medidos para avaliar o impacto dos reservatórios na emissão dos GEEs nos reservatórios em cascata. Não notaram grande impacto entre eles		2	N		N	N	N	760000	4900	-				T, pH, Condutividade, Turbidez, COD, Sedimento	
57	3	N. LeRoy Poff, Julian D. Olden, David M. Merritt, David M. Pepin	Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications	2007	Artigo	Revista	PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences	Estados Unidos	Análise dados de estações americanas para mostrar que o represamento tende a homogeneizar o escoamento da água, possivelmente desestabilizando o equilíbrio biológico da região		2	N		N	N	N	-	-	-				Vazão	
58	5	H. Lauri, H. de Moel, P. J. Ward, T. A. Räsänen, M. Keskinen, M. Kummu	Future changes in Mekong River hydrology: impact of climate change and reservoir operation on discharge	2012	Artigo	Revista	Hydrology and Earth System Sciences	China - Rio Mekong	Desenvolve modelo hidrologico e simula em cenários diferentes, incluindo mudanças climáticas e operação de reservatórios. Reservatórios afetam muito mais que as mudanças climáticas	Vmod	2	S		S	N	N	N	795000	-		3 - 12 h		151 Estações de chuva, 61 de temperatura, 14 anos de dados	Vazão
59	3	Wei Ouyang, Fanghua Hao, Kaiyu Song, Xuan Zhang	Cascade Dam-Induced Hydrological Disturbance and Environmental Impact in the Upper Stream of the Yellow River	2010	Artigo	Revista	Water Resources Management	China - Rio Anarelo	Usa modelo SWAT para modelar sequência de reservatórios e alterações nos hidrogramas, transporte de areia e nutrientes. Conclui que o represamento afeta bastante o corpo hídrico, amortizando vazões e reduzindo concentrações de nutrientes e sedimentos	SWAT	2	S		S	N	N	N	438	-				5 anos de dados	Vazão
60	3	Weixin Duan, Shengjian Guo, Jun Wang, Deil Liu	Impact of Cascaded Reservoirs Group on Flow Regime in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	2016	Artigo	Revista	Water	China - Rio Yangtze	Compara dados observados de vazão e utiliza métricas para avaliar seu grau de alteração. Propaga vazão por Muskingum	IHA, DHRA	2	N		N	N	N	N	1800000	6300	-			65 anos de dados, 24 reservatórios	



No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem														
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
61	4	Moura, A. N.; Severiano, J. S.; Tavares, N. K. A.; Dantas, E. W.	The role of a cascade of reservoirs and seasonal variation in the phytoplankton structure in a tropical river	2013	Artigo	Revista	Brazilian Journal of Biology	Brasil - Rio Contas	Medem fitoplankton em pontos do rio e estudam sua variação temporal/espacial. Concluem que os reservatórios em cascata reduzem a riqueza das algas	-	N	-	-	N	N	N	N	55000	700	-	-	-	3 anos de coleta, 28 pontos	-
62	3	Ben R. Hodges	Conservative finite-volume forms of the Saint-Venant	2019	Artigo	Revista	Hydrology and Earth System Sciences	Geral	Avalia uma formulação diferente das equações de Saint-Venant, contornando o problema de variações muito grandes na inclinações de fundo.	-	N	-	-	N	N	N	N	55000	700	-	-	-	3 anos de coleta, 28 pontos	-
63	3	Samuellon Lopes Cabral, Jose Nilson B. Campos, Cleiton Da Silva Silveira, Francisco Alberto De Assis Teixeira	equations for hydrology and urban drainage	2016	Artigo	Revista	Revista Geociências	Brasil - Rio Grandeiro	Desenvolve modelo hidrológico e hidrodinâmico usando as ferramentas da USACE para simular cheia.	HEC-HMS, HEC-RAS	S	-	-	N	N	N	N	18	7	-	-	-	Uma estação, 100 anos	Nível
64	3	Vinicius Alencar Siqueira, Mino Viana Sombas, Juan Martin Bravo, Walter Collischonn, Auler Machado Vieira Lisboa, Giovanni Gomes Villa Trinidad	Real-time updating of HEC-RAS model for streamflow forecasting using an optimization algorithm	2016	Artigo	Revista	RBRH	Brasil - Rio Iguaçu	Estuda a calibração de um modelo já feito no HEC-RAS usando SCE-UA. Diz ser funcional, mas que as considerações das contribuições laterais podem alterar a calibração (Manning)	HEC-RAS	N	S	N	N	N	N	-	200	-	Hidrograma a montante e altura normal a jusante	-	-	-	-
65	3	André Luiz Nascentes Coelho	GEOMORFOLOGIA FLUVIAL DE RIOS IMPACTADOS POR BARRAGENS1	2008	Artigo	Revista	Caminhos da Geografia	-	Faz uma análise crítica dos efeitos do represamento, com foco nos sedimentos e a jusante do reservatório	-	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	4	Alex Braz Iacone Santos, Bianca de Freitas Terra, Francisco Gerson Araujo	Influence of the river flow on the structure of fish assemblage along the longitudinal gradient from river to reservoir	2010	Artigo	Revista	Zoologia	-	Faz uma análise crítica da quantidade de peixes no rio, reservatório e área de transição. Conclui-se que essa área mistura os peixes que normalmente vivem nos ambientes lóticos e lênticos	-	N	-	-	N	N	N	-	1100	-	-	-	-	Amostragem por redes - 9 meses entre 2006 e 2007	-
67	6	StefanSchmutz, JanSendzimir	Riverine Ecosystem Management	2018	Livro	-	-	Geral	-	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
68	4	João Rafael Bergamaschi Terçini, Arisvaldo Vieira Mello Júnior	Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê	2016	Artigo	Revista	SBRH	-	Modela OD e DBO usando Streeter-Phelps para o rio Tietê	Streeter-Phelps	1	S	-	N	N	S	N	-	83	-	-	-	21 a 37 anos em 5 postos de monitoramento da CETESB	OD, DBO
69	6	Chris Goodell	HEC-RAS Dam Breach Theory and Application	2015	Manual	-	-	Geral	Explica o funcionamento do HEC-RAS	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
70	3	Ralph A. Wurbs	Modeling river/reservoir system management, water allocation, and supply reliability	2005	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	EUA - Texas	Modela as variáveis do tempo para estudos de disponibilidade	Estatística, Naturalizaçã o de vazões	4	S	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
71	3	Xinxin Song, Yanhua Zhuang, Xueli Wang, Eihua Li	Combined Effect of Danjiangkou Reservoir and Cascade Reservoirs on Hydrologic Regime Downstream	2018	Artigo	Revista	Journal of Hydrologic Engineering	China - Hanjiang River	Faz a análise de alterações no rio pós represamento, usando o índice IHA como base de análise.	IHA, RVS	2	N	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
72	4	Mustafa M Aral	Environmental Risk and Health Risk Analysis (Acts/Risk)	2010	Livros	-	-	-	Aspectos de modelagem hidrodinâmica e qualidade da água ligados a saúde humana	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
73	4	Simona Pitrillie, Loredana Brânza, Camelia Bețanu, Lucian Vasile Pavel, Florina Ungureanu, Maria Gavrilescu	Modelling and simulation of heavy metals transport in water and sediments	2007	Artigo	Revista	Environmental engineering and management journal	-	Modela aspectos do transporte de metais pesados na água e sedimento	-	S	?	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
74	4	Korachian, Reza Karamouz, Mohammad	A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-iver systems	2007	Artigo	Revista	Advances in Water Research	Iran	Estuda impacto da operação na qualidade de água do reservatório.	ADR, otimização de operação	2	S	-	N	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-

No.	Tema	Autores	Titulo	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
75	4	Chen, Xiaojian, Xu, Bo, Zheng, Yi, Zhang, Chi	Nexus of water, energy and ecosystems in the upper Mekong River: A system analysis of phosphorus transport through cascade reservoirs	2019	Artigo	Revista	Science of the Total Environment	China - Rio Mekong	Modela o transporte de fósforo em uma sequência de reservatórios em cascata	2	5			N	N	N	-																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										

No.	Tema	Autores	Titulo	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem															
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
83	4	Zubala, Tomasz	Influence of dam reservoir on the water quality in a small upland river	2009	Artigo	Revista	Ecology and Hydrobiology	Polônia - Rio Ciemiega	Avalia o impacto de um reservatório nos trechos a jusante de água, baseando-se nos dados de qualidade da água observados. Sua análise indica que os reservatórios tendem a melhorar a qualidade da água, mas que devem ser planejados prestando atenção nas condições naturais e socioeconômicas ao redor.	2	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	4	Varol, Memet Gökot, Bülent Bekleyen, Aysel Şen, Bülent	Spatial and temporal variations in surface water quality of the dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey	2012	Artigo	Revista	Catena	Turquia - Rio Tigris	Faz uma análise estatística usando CA, PCA, e FA para determinar quais variáveis tem maior impacto na variação espacial e temporal de qualidade da água.	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	4	Yihan Chena, Kaifeng Yua, Muhammad Hassana, Cong Xia, Bo Zhang, Karina Yaw-Hoong Gimb c, Yiliang Hea d,*	Occurrence, distribution and risk assessment of pesticides in a river-reservoir system	2018	Artigo	Revista	Ecotoxicology and Environmental Safety	China - Rio Dongjiang	Avalia o comportamento de pesticidas ao longo de um sistema rio - reservatório. Tem uma conclusão interessante: que no período molhado, as concentrações são altas nos dos sistemas, mas mais no rio; enquanto o período seco tem concentrações médias menores mas maiores nos reservatórios	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	4	Luo, Zengliang Shao, Quanxi Zuo, Qing Cui, Yaokui	Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin	2020	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	China - Rio Shaying	Avalia o impacto da urbanização e alterações no uso de solo no equilíbrios da fauna local e parâmetros de qualidade da água, para um rio controlado por reservatórios. Conclui que as mudanças no uso do solo afetam diretamente os parâmetros de qualidade da água, não se relacionando muito com a urbanização, e sendo mais representativo no inverno. O equilíbrio de fauna se mostrou mais complexo e ainda mais sensível às alterações, tanto de uso de solo quanto da urbanização, sem sazonalidade.	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	4	Tschelkner-Grati, Franz Bellos, Vasilis Schellart, Alma Moreno-Rodenas, Antonio Muthusamy, Manoranjan Langeveld, Jeroen Clemens, François Benedetti, Lorenzo Rico-Ramirez, Miguel Angel de Carvalho, Rita Fernandes Breuer, Luiz Shucksmith, James Heuvelink, Gerard B.M. Tait, Simon	Recent insights on uncertainties present in integrated catchment water quality modelling	2019	Artigo	Revista	Water Research		Discute as incertezas envolvidas na modelagem integrada de bacia - rio, incluindo aquelas devido a diferenças de escala temporal dos dados representados e suas incertezas, representação dos fenômenos e incertezas em geral do desenvolvimento de modelos integrados	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	Vazão	-	-
88	4	Barilier, Agnès Garnier, Josette Coste, Michel	Experimental reservoir water release: Impact on the water quality on a river 60 km downstream (upper Seine river, France)	1993	Artigo	Revista	Water Research	França - Rio Sena	Foi criada uma onda a partir da abertura de comportas em um reservatório, e então avaliou-se a variação nas concentrações de poluentes nos trechos a jusante de rios	N	-	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-

No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem														
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
89	4	Chung, Se Woong Ko, Ick Hwan Kim, Yu Kyung	Effect of reservoir flushing on downstream river water quality	2008	Artigo	Revista	Journal of Environmental Management	Korea - Rio Geum	Avalia o impacto da descarga de um reservatório nos trechos a jusante de rio, executando uma descarga elevada, de 30 para 2.00m <sup>3</sup> /s, e continua ao longo de 6 horas, amostrando e avaliando os resultados. Desenvolveu-se então um modelo para simular esses resultados, tendo sucesso na simulação hidrodinâmica e de frações de nitrogênio e fósforo, mas não para nutrientes orgânicos e DBO, comportamento atribuído a característica do modelo de não considerar mecanismos de ressuspensão	S	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	3	Passalunghi, Otávio Siqueira, Vinícius Alencar Breda, João Paulo Fleischmann, Ayan Santos Paiva, Rodrigo Cauduro Dias de	Impact of large reservoirs on simulated discharges of Brazilian rivers	2020	Artigo	Revista	RBRH	Brasil	Avalia o impact da substituição de vazões naturais por observadas no modelo MGB em escala continental. Conclui que é difícil criar as regras de descarga dos reservatórios.	3	S	MGB	MGB	S	N	N	-	-	-	-	-	-	-	Vazão, Nível
91	4	Tranmer, Andrew W. Weigel, Dana Martí, Clelia L. Vidgar, Dmitri Benjankar, Rohan Tonina, Daniele Goodwin, Peter Imberger, Jörg	Coupled reservoir-river systems: Lessons from an integrated aquatic ecosystem assessment	2020	Artigo	Revista	Journal of Environmental Management	EUA - Rio Deadwood	Avaliar o impacto das vazões de saída dos reservatórios sob o ponto de vista da fauna no reservatório e trecho subsequente de rio. Conclui que a previsão da melhor vazão de descarga é complicada pela alta variação hidrológica da área de estudo, mas importante para manter o equilíbrio ambiental.	S	2	"3D Reynolds averaged Navier-Stokes", Saint-Venant, ADR	AEM3D, Mike11	N	S	N	6.4	38	Vazão de saída e temperatura do reservatório (jusante)	-	100x100x1 (grid reservatório), 30M (MDE rio)	-	-	-
92	3	Yevjevich, Vulica M	Bibliography and Discussion of Flood-Routing Methods and Unsteady Flow in Channels	1964	Livro	-	-	-	Avalia métodos de propagação de onda	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
93	4	Steven C Chapra	Surface Water-Quality Modeling	2008	Livro	-	-	-	Base teórica	-	N	-	-	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-	-
94	3	Gichamo, T. Z. Popescu, I. Jonoski, A. Solomatine, D.	River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling	2012	Artigo	Revista	Environmental Modelling and Software	Hungria - Rio Tisa	Avalia o uso de MDE para geração de "seções transversais sintéticas" so rio. Seus resultados são satisfatórios mas indicam a necessidade de correção dos dados, dado a baixa resolução dos MDEs em geral	S	-	Saint-Venant	HEC-RAS, GEORAS	N	S	N	-	88.4	Hidrogama (montante) e nível (jusante)	-	-	-	-	Vazão, nível
95	3	Pramanik, Niranjan Panda, Rabindra Kumar Sen, Dhrubajyoti	One dimensional hydrodynamic modeling of river flow using DEM extracted river cross-sections	2010	Artigo	Revista	Water Resources Management	India - Bacia Brahmani	Avalia a eficiência na extração de seções transversais do MDE, assim como de correções, e compara com as seções transversais medidas em alguns pontos. Conclui que as seções geradas são próximas as observadas, com erros pequenos que podem ser corrigidos na calibração	S	-	Saint-Venant	Mike11	N	S	N	39.269	-	Hidrogama, nível	-	-	-	-	Vazão, nível
96	3	Steinstrasser, Carlos Eduardo	Método difusivo de Lax aplicado na solução das equações de Saint Venant	2005	Tese	-	PPGERHA	-	Estuda o método de Lax para solução das equações de Saint-Venant	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



No.	Tema	Autores	Título	Ano	Tipo publicação	Meio	Nome Publicação	Área de estudo	Metodologia e objetivo	Detalhes Modelagem														
										1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
97	3	Fleischmann, Ayan Paiva, Rodrigo Collischonn, Walter	Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison	2019	Artigo	Revista	Journey of Hydrology X	Brasil - Rio Itajaí Açu	Desenvolve modelos em escala local, regional e global para solução de modelo bacia - rio, comparando com resultados de um modelo no HEC-RAS. Concluem que o modelo global gera resultados satisfatórios, mas menos precisos que os locais - em especial por conta do intervalo entre seções	-	-	Saint-Venant, Hanfall	HEC-RAS, MGB	S	N	N	15000	-	-	-	-	-	-	Vazão, nível
98	4	Vijay, Ritesh Gupta, Rajesh Dash, Siddhant	Modelling approach for water quality assessment of Pili River using HEC-RAS	2017	Artigo	Revista	Journal of Indian Water Works Association	Índia - rio Pili	Desenvolve modelo hidrodinâmico e de qualidade da água para o rio Pili, na Índia.	-	S	Saint-Venant, ADR	HEC-RAS	N	S	S	217,56	17,9	-	-	-	-	-	Vazão, nível, DBO, OD
99	4	Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture	Evaluating the Transport and Fate of Nutrients in Large Scale River Basins Using an Integrated Modeling System	2013	Artigo	Revista	Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture	EU - Rio Mississippi	Desenvolve um modelo integrado bacia - rio (SWAT - HEC-RAS) aplicado a bacia do alto do Rio Mississippi.	-	S	SWAT, Saint-Venant	SWAT, HEC-RAS	S	S	N	490000	2011	Vem do SWAT	-	-	-	-	Vazão, sedimento, fósforo total
100	1	CNRH	Resolução nº 91 - Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterâneos	2009	Lei	-	-	Brasil	Disposições sobre enquadramento	-	N	-	-	N	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-
101	1	Brasil	Lei Nº 9.433 / 1997 - Política Nacional de Recursos Hídricos	1997	Lei	-	-	Brasil	Cria a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e define o Enquadramento	-	N	-	-	N	N	N	N	-	-	-	-	-	-	-
102	4	Mannina, Giorgio Viviani, Gaspare	A hydrodynamic water quality model for propagation of pollutants in rivers	2010	Artigo	Revista	Water Science & Technology	Itália - Rio Savena	Desenvolve modelo hidrodinâmico e de qualidade da água como foco na solução numérica, focando no método de geração de cargas a jusante visando reduzir oscilações na solução numérica, com objetivo geral de entender melhor a relação entre cargas na bacia - alterações na qualidade da água.	-	S	Saint-Venant, ADR	-	N	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-
103	4	Ferreira, Danieli Mara Fernandes, Cristóvão Vicente Scapolatempo Kavisiki, Eloy Fontane, Darrell	Transformation rates of pollutants in rivers for water quality modelling under unsteady state A calibration method	2020	Artigo	Revista	Journal of Hydrology	Brasil - Alto do Rio Iguaçu	Desenvolve metodologia para calibração baseado em coeficientes diários, chamado de TRATS	-	S	Saint-Venant	SIQUAL	N	S	S	-	-	-	-	-	-	-	Vazão, DBO, Norg, OD
104	3	Ferreira, Danieli Mara Fernandes, Cristóvão Vicente Scapolatempo Gomes, Julio	Verification of Saint-Venant equations solution based on the lax diffusive method for flow routing in natural channels	2017	Artigo	Revista	RBRH	-	-	-	-	Saint-Venant	-	N	S	N	S	-	-	-	-	-	-	Vazão

## B Disponibilidade de dados

A obtenção de dados de várias fontes implica em duplicatas, que devem ser compatibilizadas. O critério para essa filtragem foi a distância entre estações: definiu-se distância mínima de 50 metros entre estações para que não fossem consideradas duplicadas. As estações HIDROWEB 64120000 e 64120100, por exemplo, tem a mesma localização mas dados diferentes, requerendo a compatibilização desses dados.

Os dados foram organizados a partir do Inventário ANA, que é uma base de dados com informações das estações do HIDROWEB, listando os nomes que os órgãos locais, como CETESB e DAEE, dão para as estações (ANA, 2019b). Pode-se usar como exemplo a estação HIDROWEB 64005000, chamada pelo DAEE de 5E-003. O do Inventário ANA também traz algumas informações adicionais sobre as estações: nome, área de drenagem, altitude e nome do rio. A parte de processamento envolveu separar as estações na calha principal dos rios Paranapanema e Itararé, usando o software QGIS, e calcular a distância da nascente. Esses dados estão organizados na tabela 6. Destaca-se que o parâmetro com mais dados observados é nitrogênio e que mesmo para o ano de 2012, aquele com mais dados disponíveis, poucas estações tem as séries de vazões observadas.

Tabela 6: Disponibilidade de dados para as estações no Rio Parapanema. FONTE: o autor

Estacao	Estacao outra	Area de Drenagem	Posicao	Distancia da origem	Distancia da junção	Latitude	Longitude	Altitude	ST	RD	Q	2012	N	DBO	OD	NT	PT	PO4T	PO4ORTO
64005000	5E-003	687	Rio	14154.51		-23.942	-48.213	650	S	N	S	N	S	N	N	N	N	N	N
64082000		5790	Rio	125670.87		-23.600	-48.483	569	N	S	S	N	S	S	N	N	N	N	N
64081000	PARP 02100	5820	Rio	129947.97		-23.591	-48.494	590	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	N
64080000		5860	Rio	130056.97		-23.593	-48.491	571	N	S	S	S	S	S	N	N	S	S	N
64150000		12700	Reservatorio	252012.24		-23.300	-49.000	-	N	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64214000	JURU 02500	12700	Reservatorio	254884.56		-23.261	-49.001	590	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	N
64215080		17900	Reservatorio	281439.12		-23.210	-49.229	571	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
1	5E-007	-	Reservatorio	848167.57		-23.483	-48.909	573	S	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64215000	6E-007	17900	Rio	282009.93		-23.200	-49.233	540	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64219000		18400	Rio	310390.39		-23.160	-49.368	531	N	N	N	N	N	S	N	S	N	N	N
64219080		18400	Rio	314567.93		-23.154	-49.380	-	N	N	S	N	S	N	N	N	N	N	N
64219200		18401	Rio	315325.42		-23.160	-49.379	514	S	S	S	N	S	N	N	N	N	N	N
64220000		18400	Rio	324304.98		-23.183	-49.383	475	N	S	S	N	S	N	S	N	N	N	N
64220050		18300	Rio	325383.19		-23.179	-49.392	495	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
64225000		19200	Reservatorio	361422.11		-23.144	-49.600	420	N	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64268000		19300	Reservatorio	372843.86		-23.100	-49.683	-	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64269000		19300	Reservatorio	372843.86		-23.100	-49.683	400	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64270080		27800	Rio	381854.68	3185.00	-23.128	-49.732	479.6	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
64270000		27800	Rio	382013.65	3343.96	-23.129	-49.727	400	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N
64270050		27800	Rio	382693.90	4024.22	-23.121	-49.728	395.2	N	S	N	N	N	S	S	N	N	S	N
64273000	6E-001	27800	Rio	386202.36	7532.68	-23.098	-49.740	-	N	N	S	N	S	N	N	N	N	N	N
64275000		27800	Rio	387274.57	8604.88	-23.100	-49.750	400	N	S	S	N	S	N	S	N	N	N	N
64278080		28200	Rio	399447.67	20777.98	-23.068	-49.838	400	N	N	S	S	S	S	N	S	S	N	N
64278500		27945	Rio	400553.58	21883.89	-23.071	-49.846	392	S	S	S	N	S	N	N	N	N	N	N
64280000		28500	Reservatorio	409249.50	30579.82	-23.017	-49.900	390	N	S	S	N	S	N	N	N	N	N	N
64326000	PARP 02500	28600	Reservatorio	411688.36	33018.67	-22.998	-49.908	396	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	S

Estacao	Estacao outra	Area de Drenagem	Posicao	Distancia da origem	Distancia da junção	Latitude	Longitude	Altitude	ST	RD	Q	2012	N	DBO	OD	NT	PT	PO4T	PO4ORTO
64332080		38800	Reservatorio	435411.33	56741.65	-22.905	-50.001	385	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
64330000		37700	Reservatorio	436684.13	58014.45	-22.902	-49.982	385	N	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64331000		37700	Reservatorio	436684.13	58014.45	-22.902	-49.982	380	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64332000	6D-004	38800	Reservatorio	436930.82	58261.14	-22.900	-49.983	405	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64335100		38800	Reservatorio	442400.66	63730.98	-22.900	-50.017	355	N	S	S	N	S	S	S	N	N	N	N
64335000		38800	Reservatorio	444246.88	65577.19	-22.900	-50.033	361	N	S	N	N	S	S	S	N	N	S	N
64345075		39600	Reservatorio	471787.57	93117.89	-22.938	-50.249	369	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
64345080		41300	Reservatorio	507269.69	128600.00	-22.944	-50.517	354	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
64450600	7D-001	-	Reservatorio	579985.53	201315.84	-22.790	-50.993	-	N	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64510000	7D-002	81200	Reservatorio	581892.78	203223.09	-22.789	-51.008	295	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
64516080		84700	Reservatorio	623762.24	245092.56	-22.663	-51.359	338	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N	N
64515000		84800	Reservatorio	624501.46	245831.78	-22.656	-51.365	250	S	S	S	N	S	N	N	N	N	N	N
64516900	PARP 02750	84900	Reservatorio	627059.98	248390.30	-22.661	-51.388	267	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	S
64517000		84900	Reservatorio	628293.85	249624.17	-22.667	-51.400	281	S	S	S	N	S	S	S	S	S	S	N
64525000		87600	Reservatorio	672297.61	293627.93	-22.625	-51.745	247	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64535080		88800	Reservatorio	702864.17	324194.49	-22.541	-52.000	287	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64570000		99300	Reservatorio	787802.58	409132.90	-22.570	-52.594	238	S	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64571100	PARP 02900	101000	Reservatorio	820274.96	441605.28	-22.597	-52.874	255	N	N	N	N	N	S	S	N	N	S	S

Tabela 7: Disponibilidade de dados para as estações no Rio Itararé. FONTE: o autor

Estacao	Estacao outra	Area de Drenagem	Posicao	Distancia da origem	Distancia da junção	Latitude	Longitude	Altitude	ST	RD	Q	2012	N	DBO	OD	NT	PT	PO4T	PO4ORTO
64231000		1550	Rio	71492.84	71492.84	-24.0328	-49.4614	530	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	N
64245200	ITAR 02500	4230	Rio	142821.7	71328.86	-23.7256	-49.5531	475	N	N	N	N	N	S	S	S	S	S	S
64247000		4230	Rio	143121.7	300	-23.7233	-49.5558	471	N	S	S	S	S	S	S	N	N	S	N
64245000		4230	Rio	143821.7	700	-23.7167	-49.55	-	N	S	S	N	S	S	S	N	N	S	N
64248000		5000	Rio	159847.86	16026.16	-23.6	-49.6167	470	S	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64260000		7400	Reservatorio	187512.54	27664.68	-23.4	-49.6	-	N	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N
64265000	6.00E-02	7600	Reservatorio	187512.54	0	-23.40083333	-49.60066667	520	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	N

## C Dedução das Equações de Saint-Venant

As equações de Saint-Venant descrevem o escoamento em regime não permanente da água, cuja aplicação em 1D pode ser usada para representar o escoamento de rios. A dedução das equações foi baseada nos trabalhos de LOBEIRO (2012), Castagnoli (2007), USACE (2016), Steinstrasser (2005) e White (2011).

### C.1 Equação da Continuidade

O princípio da continuidade descreve, em termos práticos, que uma determinada massa que sai de um volume é igual à que entra mais o armazenamento. A Figura C.1 representa esse processo em sistema de escoamento em 1D e apresenta os termos da dedução.

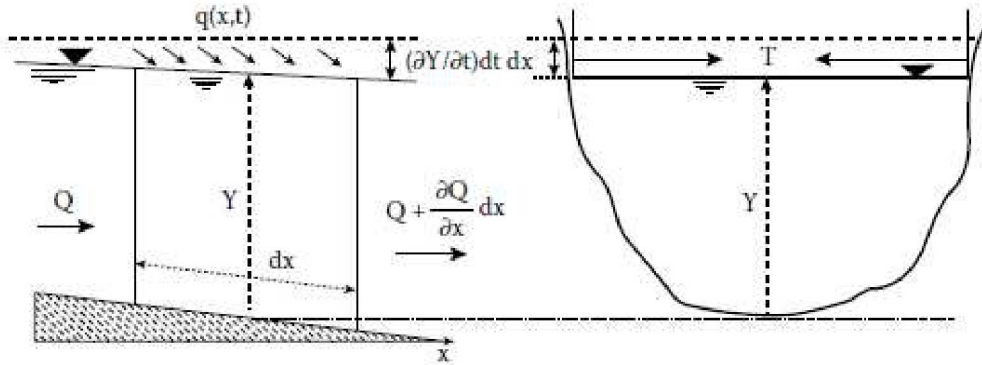


Figura C.1: Vazões em um elemento infinitesimal

Onde:

O volume e massa desse sistema pode ser descrito conforme a equação 1 (Teorema de transporte de Reynolds), que diz que o volume de um elemento infinitesimal obtido através da integração do volume de controle é igual aquele obtido através da integração das superfícies de controle.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} \rho dV = \iint_{SC} \rho U dA \quad (1)$$

A variação do volume de controle pode ser descrito pela equação 2.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} \rho dV = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} \quad (2)$$

O termo da superfície de controle pode ser dividido em duas partes: fluxo que entra (equação 3) e que sai (equação 4).

$$\iint_{entra} \rho V dA = \rho(Q + q dx) \quad (3)$$

$$\iint_{sai} \rho V dA = -\rho(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx) \quad (4)$$

Substituindo as equações 2, 3 e 4 em 1, obtém-se:

$$\frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} = \rho(Q + q dx) + -\rho(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx) \quad (5)$$

Que ao ter seus termos reordenados, gera a equação 6, a equação da continuidade.

$$\boxed{\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q} \quad (6)$$

## C.2 Equação da Quantidade de Movimento

A equação de quantidade de movimento é baseada na segunda lei de Newton que, para sistemas, diz:

”A força resultante que atua sobre um corpo é proporcional ao produto da massa pela aceleração por ele adquirida”

Expressa pela equação 7:

$$\Sigma F_x = \frac{\overrightarrow{dM}}{dt} \quad (7)$$

Onde:  $\Sigma F_x$  = somatório das forças no eixo x e  $\overrightarrow{dM}/dt$  é a variação da quantidade de movimento no tempo (aceleração).

Quando o volume de controle coincide com o do sistema, as forças que atuam no volume de controle e no sistema são as mesmas, ou seja:

$$\Sigma \vec{F}_{\text{sis}} = \Sigma \vec{F}_{\text{Conteúdo do VC coincidente}} \quad (8)$$

Aplicando o teorema de transporte de Reynolds no volume de controle coincidente ao sistema, tem-se:

$$\frac{D}{Dt} \int_{\text{sis}} U \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} U \rho dV + \int_{SC} U \rho \vec{U} \bullet \vec{n} dA \quad (9)$$

Onde: U = velocidade, V = volume,  $\rho$  = massa específica do fluido, VC = volume de controle, SC = superfície de controle, A = área.

Combinando as equações 7, 8 e 9, tem-se a equação 10, que representa as três componentes das forças em x:  $F_p$  (pressão),  $F_a$  (atrito, ou dissipativa) e  $F_g$  (gravidade), conforme a equação 11.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} U \rho dV + \int_{SC} U \rho \vec{U} \bullet \vec{n} dA = \Sigma \vec{F}_{\text{conteúdo do VC}} \quad (10)$$

$$\Sigma \vec{F}_x = F_p + F_a + F_g \quad (11)$$



## C.2.1 Somatório de Forças em x

### C.2.1.1 Força de Pressão

A força de pressão é baseada na profundidade do ponto avaliado e pelo tamanho da superfície de controle do ponto, relação expressa pelas equações 12, para o caso de seção transversal com largura constante, e pela equação 13 para seção transversal não regular.

$$F_p = \int_0^h p dA \quad (12)$$

$$F_p = \int_0^h \underbrace{\rho g(h-z)}_p \underbrace{T(y) dz}_{dA} \quad (13)$$

Onde:  $h$  = profundidade,  $\rho$  = peso específico da água,  $z$  = distância do fundo,  $T(y)$  = largura em função da profundidade  $y$ ,  $dA$  = diferencial da área,  $dz$  = diferencial da profundidade.

Essa força de pressão pode ser divididas em três partes:  $F_{pm}$ ,  $F_{pj}$  e  $\Delta F_p$ , representando as forças de pressão a montante, jusante e a variação entre elas (equação 14)

$$F_p = F_{pm} - F_{pj} + \Delta F_p \quad (14)$$

Sendo que essas forças são a aplicação da força de pressão nas superfícies de controle à montante e jusante, tem-se:

$$F_{pm} = F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (15)$$

$$F_{pj} = F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (16)$$

Substituindo as equações 15 e 16 em 14, tem-se:

$$F_p = (F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}) - (F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}) + \Delta F_p \quad (17)$$

$$Fp = -\frac{\partial Fp}{\partial x}\Delta x + \Delta Fp \quad (18)$$

Voltando à equação 13 e derivando-a em x, tem-se:

$$\frac{\partial Fp}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h \rho g(h-z)T(y) dz \quad (19)$$

$$\frac{\partial Fp}{\partial x} = \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} \rho g(h-z)T(y) dz \quad (20)$$

$$\frac{\partial Fp}{\partial x} = \rho g \int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (h-z)T(y) dz \quad (21)$$

$$\frac{\partial Fp}{\partial x} = \rho g \int_0^h \left[ \frac{\partial(h-z)}{\partial x} T(y) + (h-z) \frac{\partial T(y)}{\partial x} \right] dz \quad (22)$$

$$\frac{\partial Fp}{\partial x} = \rho g \left[ \int_0^h \frac{\partial(h-z)}{\partial x} T(y) dz + \int_0^h (h-z) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dz \right] \quad (23)$$

$$\frac{\partial Fp}{\partial x} = \rho g \left[ \frac{\partial h}{\partial x} \underbrace{\int_0^h T(y) dz}_A + \int_0^h (h-z) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dz \right] \quad (24)$$

$$\frac{\partial Fp}{\partial x} = \rho g \left[ \frac{\partial h}{\partial x} A + \int_0^h (h-z) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dz \right] \quad (25)$$

Também da equação 13, tem-se:

$$\Delta Fp = \int_0^h \rho g(h-z) [T_1(y) - T_2(y)] dz \quad (26)$$

Aplicando a regra de Leibnitz:

$$\Delta Fp = \int_0^h \rho g(h-z) \left[ \left( T(y) + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left( T(y) - \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] dz \quad (27)$$

$$\Delta Fp = \rho g \int_0^h (h-z) \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x dz \quad (28)$$

Substituindo as equações 25 e 28 em 18, chega-se na equação 29 que, ao ser simplificada, resulta na equação 30, resultante das forças de pressão.

$$Fp = -\rho g \left[ \frac{\partial h}{\partial x} A + \int_0^h (h-z) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dz \right] \Delta x + \rho g \int_0^h (h-z) \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x dz \quad (29)$$

$$Fp = -\rho g \frac{\partial h}{\partial x} A \Delta x \quad (30)$$

#### C.2.1.2 Força de Atrito

A força de atrito é aquelas entre a superfície de contato do fluido com os lados do canal, representada pela equação 31:

$$Fa = \tau p \Delta x \quad (31)$$

Onde:  $\tau$  = tensão tangencial e  $p$  = pressão.

Sendo que:

$$\tau = \rho C_D U^2 \quad (32)$$

Onde:  $C_D$  = coeficiente de atrito.

$$C_D = \frac{g}{C^2} \quad (33)$$

Onde:  $g$  = aceleração da gravidade,  $C$  = coeficiente de Chezy.

$$U = C\sqrt{RS_f} \quad (34)$$

Onde:  $S_f$  = inclinação da linha de energia.

Substituindo as equações 33 e 34 na equação 32, tem-se:

$$\tau = \rho \frac{g}{C^2} (C\sqrt{RS_f})^2 \quad (35)$$

$$\tau = \rho g RS_f \quad (36)$$

Substituindo a equação 36 na equação 31, tem-se:

$$Fa = \rho g \underbrace{R}_{A/P} S_f P \Delta x \quad (37)$$

$$Fa = \rho g AS_f \Delta x \quad (38)$$

### C.2.1.3 Força da gravidade

Essa componente de força representa o peso do fluido, expressa pela equação 39:

$$F_g = \underbrace{W}_{\rho g A \Delta x} \sin \phi \Delta x \quad (39)$$

Considerando que o ângulo com a horizontal é pequeno, tem-se:

$$\sin\phi \approx \tan\phi = \frac{-\partial z_0}{\partial x} \quad (40)$$

Substituindo a equação 40 em 39, obtém-se:

$$F_g = -\rho g A \Delta x \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (41)$$

Com todas as parcelas de força, pode-se substituir as equações 30, 38 e 41 na equação 11, criando:

$$\Sigma F_x = -\rho g \frac{\partial h}{\partial x} A \Delta x + \rho g A S_t \Delta x - \rho g A \Delta x \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (42)$$

## C.2.2 Somatória das Forças no Volume de Controle

### C.2.2.1 Termo 1

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} V \rho d\forall = \rho \frac{\partial}{\partial t} \left[ U \int_{VC} d\forall \right] \quad (43)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} V \rho d\forall = \rho \frac{\partial}{\partial t} [U \forall] \quad (44)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} V \rho d\forall = \rho \frac{\partial}{\partial t} [U A \Delta x] \quad (45)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} V \rho d\forall = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (46)$$

### C.2.2.2 Termo 2

Baseando-se na equação 10, temos:

$$\int_{SC} U \rho \vec{U} \bullet \vec{n} dA = \rho(U_2^2 A_2 - U_1^2 A_1) \quad (47)$$

Onde os termos indicam as componentes de velocidade e área, para a força de pressão a jusante (2) e montante (1):

$$U_2 = U + \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (48)$$

$$U_1 = U - \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (49)$$

$$A_2 = U + \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (50)$$

$$A_1 = U - \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (51)$$

Desenvolvendo a equação 47 após a substituição dos termos, de acordo com as relações das equações 48 - 51, tem-se:

$$\int_{SC} V \rho V \cdot \vec{n} dA = \rho \left[ U^2 \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x + 2AU \frac{\partial U}{\partial x} \Delta x \right] \quad (52)$$

Substituindo os termos 11, 46 e 52 na equação 10, tem-se:

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} + \rho \left[ U^2 \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x + 2AU \frac{\partial U}{\partial x} \Delta x \right] = -\rho g \frac{\partial h}{\partial x} A \Delta x + \rho g A S_f \Delta x - \rho g A \Delta x \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (53)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} + 2AU \frac{\partial U}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} A + g A S_f - g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (54)$$

sendo que:

$$U^2 \frac{\partial A}{\partial x} + 2AU \frac{\partial U}{\partial x} = U^2 \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial U^2}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial x} = U^2 \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial U^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} AU^2 \quad (55)$$

Tem-se :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} AU^2 = -g \frac{\partial h}{\partial x} A + gAS_f - gA \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (56)$$

Dado que a relação entre vazão, velocidade e área segue a relação:

$$Q = UA; \quad (57)$$

E que a elevação da superfície da água é igual a  $z_0 + h$ :

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (58)$$

Tem-se a equação 59, a equação da quantidade de movimento, na formatação apresentada na documentação do HEC-RAS:

$$\boxed{\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} QU = -gA \left( S_f - \frac{\partial z}{\partial x} \right)} \quad (59)$$

## D Pré-processamento de dados

O objetivo desse apêndice é descrever como foram separados os dados para a geometria e condições de contorno, assim como o processamento envolvido antes de sua inserção no modelo HEC - RAS.

### D.1 Geometria

Entre as variáveis envolvidas nas equação de Saint-Venant, algumas são responsáveis por representar a geometria do problema, como a inclinação de fundo e área da seção transversal. Estudou-se duas formas de se inserir esses dados: usando os dados disponíveis no HIDROWEB e uma junção desses com o MDE.

#### D.1.1 Seções HIDROWEB

Algumas estações do HIDROWEB têm medições de seções transversais, detalhadas no apêndice B. São oito seções transversais ao longo dos rios Paranapanema e Itararé, com distância média entre si de 133,75 quilômetros, e que não representam os reservatórios.

Assume-se nesse estudo que a representação de especificidades do escoamento, como transições, não produz efeitos significativos sobre a simulação de qualidade de água para os fins de interesse nessa pesquisa (curva de permanência aplicadas a gestão). Se o objetivo fosse simular áreas de inundação, como descrito por Gichamo et al. (2012) e Md Ali et al. (2015), ou a mistura de poluentes em campo próximo, o detalhamento maior da geometria seria necessário. Apresenta-se na Figura D.2 a concepção inicial da geometria dos rios, gerada a partir das seções transversais disponíveis no HIDROWEB, sobrepostas ao MDE da região, extraída do HEC-RAS.



Figura D.2: Vista das elevações da bacia (MDE) e rios Paranapanema e Itararé, gerados a partir das seções transversais disponíveis no HIDROWEB.

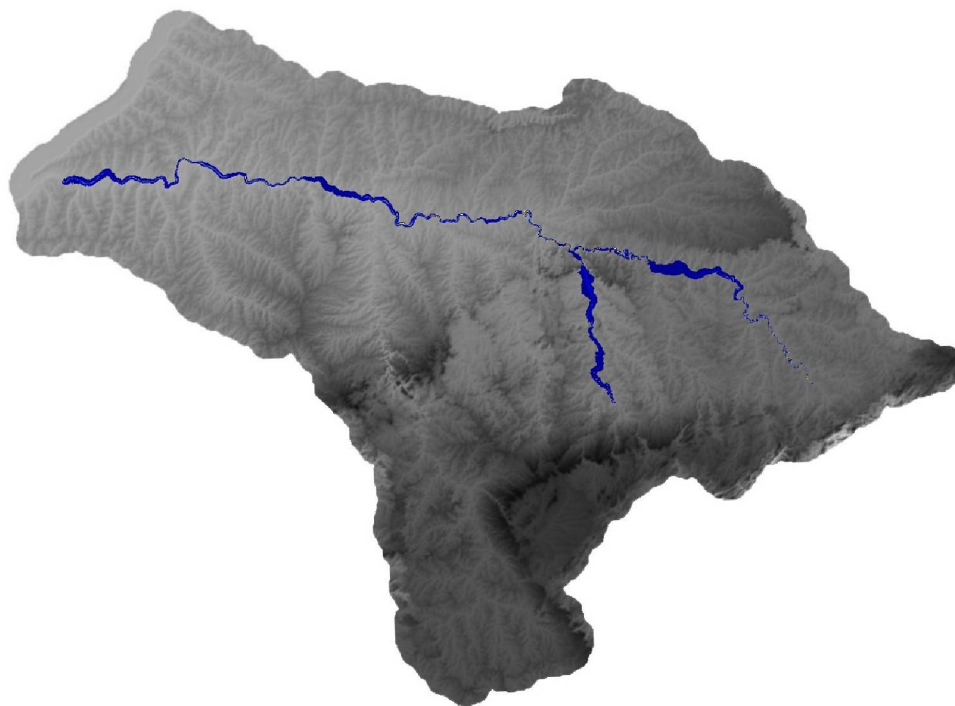


FONTE: O autor (2021).

### D.1.2 Modelo de Elevação de Terreno

Essa estratégia de integração do MDE com a batimetria de reservatórios permite uma representação mais fiel do sistema, a exemplo da abordagem utilizada por Pramanik et al. (2010); Correia (2018). Essa junção é importante pois as imagens de satélite que geram o MDE consideram os trechos de reservatório como superfície plana, enquanto as batimetrias fornecem os contornos do reservatório e a profundidade da coluna de água. Juntando-se essa informação ao traçado dos trechos de rio, tem-se uma representação mais completa da geometria do sistema. O resultado é apresentado na Figura D.3, sobrepondo a geometria obtida através da junção das seções transversais disponíveis no HIDROWEB e do MDE ao modelo de elevações da região. Observa-se que a adição das batimetrias permite uma representação do canal mais próxima à real que aquela apresentada no item D.1.1, especialmente por conta dos reservatórios. Essa geometria é a mesma usada nas simulações cujos resultados são apresentados no item 4.2.

Figura D.3: Resultado da simulação usando o MDE e seções transversais disponíveis no HIDROWEB para geração da geometria, sobreposto ao MDE do terreno. Em azul, as área alagadas e na escala de cinza as elevações do terreno.



FONTE: O autor (2021).

## D.2 Simulações preliminares

Foram conduzidas simulações preliminares para testar as diferentes geometrias apresentadas no item D.1 e adição da descarga das barragens como condições de contorno internas. As diferença entre essas simulações são apresentadas na tabela 8.

Tabela 8: Descrição das simulações hidrodinâmicas preliminares.

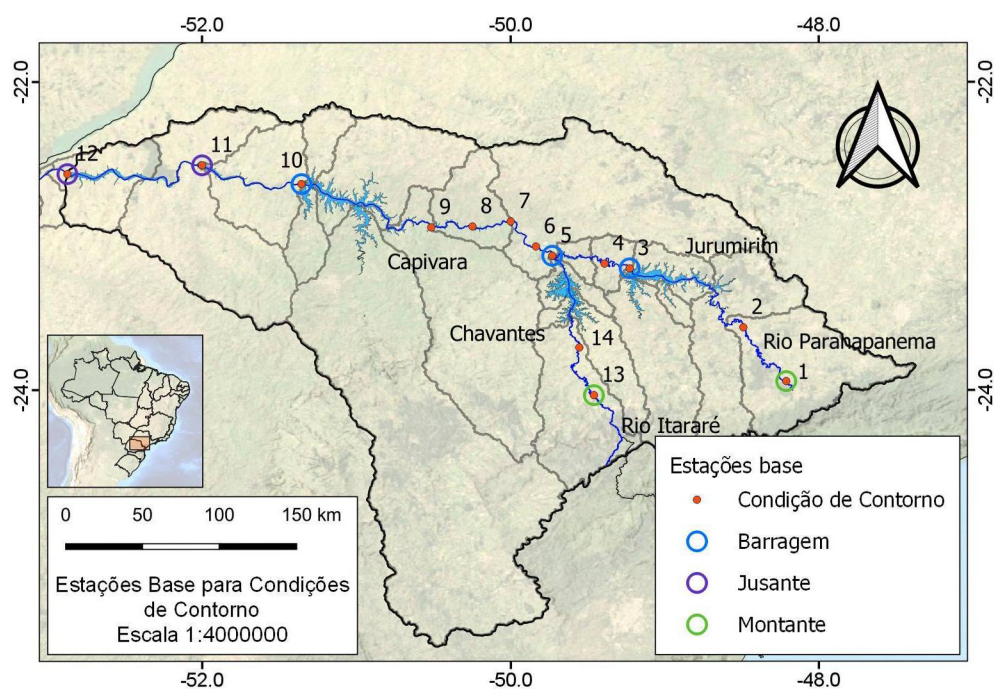
Simulação	Detalhes geometria	Detalhes condições de contorno internas
A - Fase Rio	Somente as seções transversais disponíveis no HIDROWEB, interpoladas a cada 250 metros	Diferença entre hidrografos observados
B - Fase Reservatório	Batimetria dos reservatórios e seções disponíveis no HIDROWEB para os trechos de rio	Diferença entre hidrografos observados
C - Fase Barragem (Final)	Batimetria dos reservatórios e seções disponíveis no HIDROWEB para os trechos de rio	Diferença entre hidrografos observados, hidrograma de descarga dos reservatórios

Usou-se um valor de 0,020 para o coeficiente de Manning ( $m^{-1/3} s$ ), passo de tempo de 1 minuto e de espaço 250 metros.

### D.2.1 Resultados

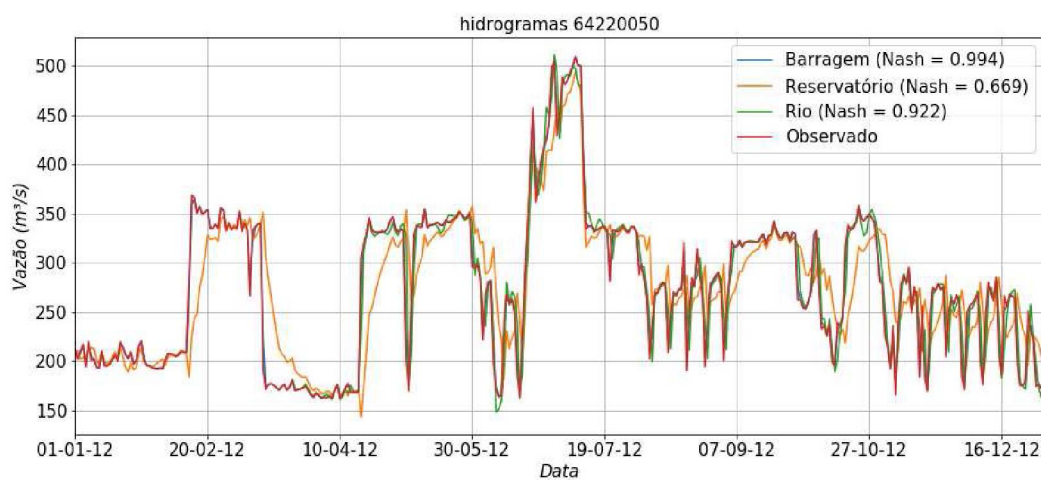
Os resultados preliminares são exibidos entre as figuras D.5 à D.7 na forma de hidrogramas, representados a comparação entre os hidrogramas simulados e observado para uma das estações no Rio Paranapanema, assim como a comparação do perfil de velocidades e de elevações. As estações tiveram resultados semelhantes, com coeficientes de Nash-Sutcliffe semelhantes, considerando as séries de vazões observadas e simuladas, mas optou-se por exibir os resultados da estação 64220050 por esse ponto deixar mais claro o efeito dos reservatórios nas simulações. A estação é o ponto 4 no mapa apresentado na figura D.4.

Figura D.4: Mapa das estações com vazões diárias observadas para o ano de 2012 e base para as condições de contorno. Os números correspondem aos códigos de estação: 1 – 64005000; 2 – 64080000; 3 = 64215080; 4 = 64220050; 5 = 64270080; 6 = 64278080; 7 = 64332080; 8 = 64345075; 9 = 64345080; 10 = 64516080; 11 = 64535080; 12 = 64571100; 13 = 64231000; 14 = 64247000.



FONTE: O autor (2021).

Figura D.5: Hidrogramas simulados e observado - Estação 64220050.



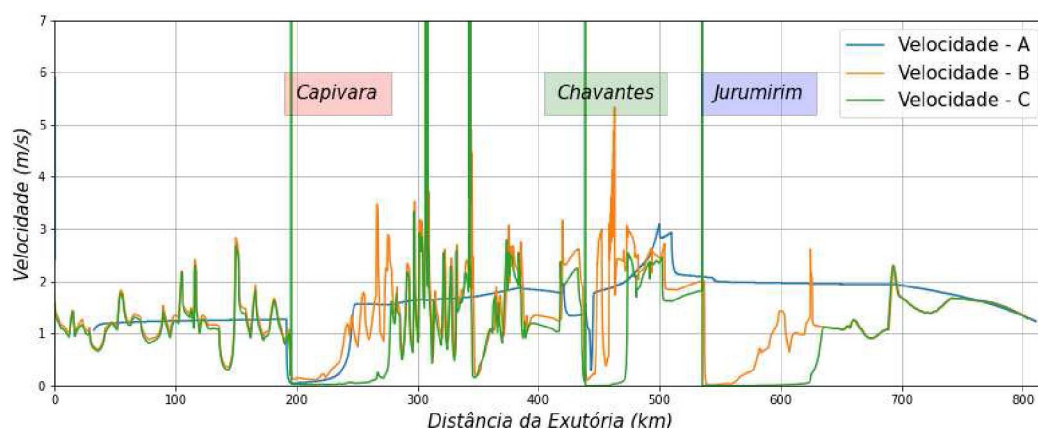
FONTE: O autor (2021).

De forma geral, pode-se notar nos resultados apresentados na Figura D.5 que as

simulações usando a descarga das barragens como condição de contorno (fase C) tiveram os melhores resultados, conforme esperado de uma representação com representação mais fiel. Nota-se que os resultados da fase A são mais satisfatórios que os da fase B, mesmo que essa incorpore a geometria dos reservatórios. Pode-se concluir que a consideração dos reservatórios como sendo a fio d'água não é válida para a área de estudo (Fase B), visto que é a que retornou os piores resultados. A Fase A também não deveria ser aplicada em estudos de qualidade da água pois, apesar do modelo conseguir replicar os hidrogramas observados, os reservatórios e suas características, como as velocidades mais baixas, devem ser considerado.

Esses resultados foram diferentes do esperado, visto que a fase B teoricamente considera uma geometria mais realista da bacia. Entretanto, o que se nota nos hidrogramas é a fase B tendem a atenuar os hidrogramas nos momentos de alteração nas descargas dos reservatórios, onde a vazão tem grande variação em um baixo intervalo de tempo. Enquanto a fase C consegue replicar essa descarga com exatidão, visto que a descarga dos reservatórios é uma das condições de contorno, as simulações da fase A conseguem propagar as vazões que entram no sistema pela contribuição lateral sem precisar passar pelos trechos de velocidades mais baixas dos reservatórios, o que acontece na fase B. Aqui, os reservatórios acabam atenuando a propagação das ondas, e atrasando os picos e vales dos seus resultados em relação as vazões observadas. Esse comportamento é visível no gráfico (Figura D.5), onde as vazões da fase B tem alguns dias de atraso em relação as fases A e C, em especial nos momentos de aumento das vazões de descarga.

Figura D.6: Comparação do perfil de velocidades entre as simulações para fases A, B e C para o dia 09/06/2012 00:00.

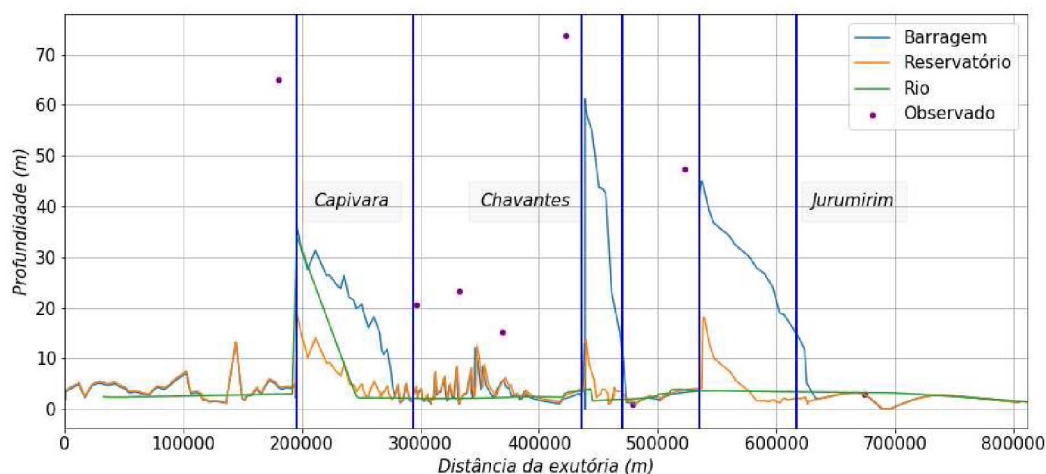


FONTE: O autor (2021).

O perfil de velocidades é referente ao dia 09 de junho 00:00 e mostra como cada um dos métodos lida com os reservatórios. Nota-se a maior eficácia em representar as baixas velocidades nos reservatórios na simulação C, que inclui as barragens. Ao considerar os reservatórios como sendo a fio d'água (simulação B), tem-se maior variação de velocidade nos trechos de reservatório, especialmente no começo, mantendo um perfil similar as da simulação C nos trechos de rio. A simulação A teve resultados satisfatórios no reservatório de Capivara, onde as seções transversais informadas para o trecho no HIDROWEB são maiores que as demais, levando a velocidade baixas, como esperada nos reservatórios. Em Jurumirim acontece o oposto: sem as seções de reservatório, não há mudança nas velocidades.



Figura D.7: Comparação do perfil de profundidades entre as simulações para fases A, B e C para o dia 09/06/2012 00:00 e dados observados.



FONTE: O autor (2021).

O perfil de profundidades comparada os resultados das simulações com as profundidades observadas, sendo que essas são a mediana das séries de profundidades nos pontos com dados observados. Essa análise permite entender melhor os detalhes de cada simulação, em especial em relação às inclinações de fundo e barragens. A geometria da simulação A não tem interferência nenhuma do terreno, sendo composta por nove seções transversais, interpoladas a cada 250m. Seu fundo não tem mudanças de inclinação bruscas, o que justifica as velocidades mais constantes.

As simulações baseadas na geometria e condições de contorno dos reservatórios (simulações B e C) tem o mesmo terreno de base e se diferenciam pela consideração das barragens em C, incluindo as vazões de descarga. Assim como no perfil de velocidades, os trechos fora dos reservatórios têm comportamento similar, mas aqueles antes e ao longo dos reservatórios não. Ao inserir as barragens, gera-se profundidades altas, coerentes com aqueles dados observados, especialmente para Jurumirim e Chavantes.